Volume 9, Issue 2, 2026

ПИЩЕВЫЕ СИСТЕМЫ
FOOD SYSTEMS

ISSN 2618-9771 (Print)
ISSN 2618-7272 (On line)
http://www.fsjour.com

Национальный, рецензируемый журнал посвящен основным проблемам науки о пищевой промышленности. Основной миссией является: создание, агрегация, поддержка и распространение научного контента в области пищевой промышленности, объединение усилий исследователей научных центров, университетов, преодоление разрыва между изданиями регионального, национального и федерального уровней. Журнал призван освещать актуальные проблемы в пищевой и смежных отраслях, продвигать новые перспективные технологии в широкую аудиторию научных и практических работников, преподавателей, аспирантов, студентов, предпринимателей. Научная концепция издания предполагает публикацию новых знаний в области пищевых систем и научных основ ресурсосберегающих технологий глубокой переработки сельскохозяйственного сырья, прорывных технических решений для производства пищевых продуктов общего и специализированного назначения. В журнале публикуются научные и обзорные статьи, доклады, сообщения, рецензии, краткие научные сообщения (письма в редакцию), информационные публикации по направлениям: технология пищевых производств; процессы, оборудование и аппараты пищевых производств; гигиена питания; биотехнология; стандартизация, сертификация, качество и безопасность; экономика; автоматизация и информатизация технологических процессов. Подробная информация для авторов и читателей представлена на сайте: www.fsjour.com.

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный центр пищевых систем им. В.М. Горбатова» РАН

ПИЩЕВЫЕ СИСТЕМЫ
www.fsjour.com

Учредитель, издатель и типография
Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный центр пищевых систем им. В.М. Горбатова» РАН
109316, Москва, Талалихина, 26

РЕДАКЦИЯ
Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный центр пищевых систем им. В.М. Горбатова» РАН
109316, Москва, Талалихина, 26
Тел.: +7-495-676-95-11, доб. 300
e-mail: a.zakharov@fncps.ru

Журнал зарегистрирован в Роскомнадзоре
Регистрационные данные:
ПИ № ФС77–71610 от 13.11.2017
ЭЛ № ФС 77–72022 от 26.12.2017
Издается с 2018 года.
Материалы публикуются на условиях лицензии CC BY 4.0
Цена свободная.
Периодичность — 4 номера в год.
Подписано в печать 29.06.2026.
Дата выхода в свет 30.06.2026.
Тираж 300 экз. Заказ № 159.

16+

© ФНЦПС, 2026
© Авторы, 2026

ISSN 2618-9771 (Print)
ISSN 2618-7272 (Online)
DOI-prefix: 10.21323/2618-9771

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР:
Кузнецова Оксана Александровна — Доктор технических наук, Директор, Федеральный научный центр пищевых систем им. В. М. Горбатова РАН, Москва, Россия

ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА:
Лисицын Андрей Борисович — Доктор технических наук, профессор, Академик РАН, Лауреат Государственной премии Российской Федерации в области науки и техники, Научный руководитель, Федеральный научный центр пищевых систем им. В. М. Горбатова РАН, Москва, Россия

ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА:
Семенова Анастасия Артуровна — Доктор технических наук, профессор, Заместитель директора, Федеральный научный центр пищевых систем им. В. М. Горбатова РАН, Москва, Россия

НАУЧНЫЕ РЕДАКТОРЫ:
Горлов Иван Федорович — Доктор сельскохозяйственных наук, профессор, академик РАН, Научный руководитель, Поволжский научно-исследовательский институт производства и переработки мясомолочной продукции», Волгоград, Россия
Настасиевич Иван — Доктор, Адъюнкт-директор, Институт гигиены и технологии мяса, Белград, Сербия
Такеда Широ —Адьюнкт-профессор, Профессор лаборатории науки о пище, Институт ветеринарной медицины, Университет Азабу, Сагамихара, Япония
Просеков Александр Юрьевич — Доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РАН, Ректор, Кемеровский государственный университет, Кемерово, Россия
Горбунова Наталия Анатольевна — Кандидат технических наук, Ученый секретарь, Федеральный научный центр пищевых систем им. В. М. Горбатова РАН, Москва, Россия
Arif Nur Muhammad Ansori — PhD, Доктор ветеринарных наук, научный сотрудник, Университет Айрланга, Сурабая, Индонезия
Tarek Gamal Abedelmaksoud — Доктор пищевых наук, Адьюнкт-профессор Кафедра пищевых наук, Сельскохозяйственный факультет, Каирский университет, Гиза, Египет

ВЫПУСКАЮЩИЙ РЕДАКТОР:
Захаров Александр Николаевич — Кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Заведующий редакционно-издательским отделом, Федеральный научный центр пищевых систем им. В. М. Горбатова, РАН, Москва, Россия

ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ:
Абрамова Любовь Сергеевна — Доктор технических наук, профессор, Заместитель директора Департамента, Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии, Москва, Россия
Баженова Баяна Анатольевна — Доктор технических наук, профессор, Профессор кафедры «Технология мясных и консервированных продуктов», Восточно-Сибирский университет технологии и управления», Улан-Удэ, Россия
Галстян Арам Генрихович — Доктор, технических наук, академик РАН, Директор, Всероссийский научно-исследовательский институт молочной промышленности РАН, Москва, Россия
Донник Ирина Михайловна — Доктор биологических наук, профессор, Академик РАН, Вице-президент РАН, Москва, Россия
Евдокимов Иван Алексеевич — доктор технических наук, профессор, Заведующий кафедрой «Технология молока и молочных продуктов» Северо-Кавказский федеральный университет, Ставрополь, Россия
Иванкин Андрей Николаевич — Доктор химических наук, профессор, Заведующий кафедрой «Химия», Мытищинский филиал МГТУ им. Н. Э. Баумана, Мытищи, Московская область, Россия
Кочеткова Алла Алексеевна — Доктор технических наук, профессор, Руководитель лаборатории пищевых биотехнологий и специализированных продуктов, Федеральный исследовательский центр питания, биотехнологии и безопасности пищи, Москва, Россия
Машенцева Наталья Геннадиевна — Доктор технических наук, доцент, профессор РАН, профессор, кафедра «Биотехнология и технология продуктов биоорганического синтеза» Московский государственный университет пищевых производств, Москва, Россия
Мирошников Сергей Александрович — Доктор биологических наук, профессор, член-корреспондент РАН, Ректор, Оренбургский государственный университет, Оренбург, Россия
Римарева Любовь Вячеславовна — Доктор технических наук, профессор, Академик РАН, Главный научный сотрудник, Всероссийский научно-исследовательский институт пищевой биотехнологии — филиал Федерального исследовательского центра питания, биотехнологии и безопасности пищи, Москва, Россия
Петров Андрей Николаевич — Доктор технических наук, профессор, Академик РАН, Директор, Всероссийский научно-исследовательский институт технологии консервирования — филиал Федерального научного центра пищевых систем им. В. М. Горбатова РАН, Видное, Московская область, Россия
Ребезов Максим Борисович — Доктор сельскохозяйственных наук, профессор, Главный научный сотрудник, Федеральный научный центр пищевых систем им. В. М. Горбатова РАН, Москва, Россия
Чернуха Ирина Михайловна — Доктор технических наук, профессор, Академик РАН, Заведующий отделом, Федеральный научный центр пищевых систем им. В. М. Горбатова РАН, Москва, Россия

The national peer reviewed journal is dedicated to the main problems of food science. The main mission is to create, aggregate, support and distribute the scientific content in the field of the food industry, join the efforts of researchers from scientific centers and universities, bridge the gap between publications at the regional, national and federal levels. The journal serves to highlight topical problems in the food and related industries, promote new promising technologies among the wide audience of scientific and practical professionals, lecturers, students, postgraduate students and entrepreneurs. The scientific concept of the journal envisages publication of new knowledge in the field of food systems and scientific foundations of the resource saving technologies for deep processing of agricultural raw materials, breakthrough technical solutions for producing food of general and specialized purpose. The journal publishes scientific and review papers, reports, communications, critical reviews, short scientific communications (letters to the editorial office), information materials concerned with food technology, processes, equipment and apparatus for food production, nutritional hygiene, biotechnology, standardization, certification, quality and safety, economics, automation and informatization of technological processes. The detailed information is given on the site: www.fsjour.com.

Minister of Science and Higher Education of the Russian Federation

V.M. Gorbatov Federal Research Center for Food Systems of Russian Academy of Sciences (Gorbatov Research Center for Food Systems)

FOOD SYSTEMS
www.fsjour.com

Founder, Publisher and Printing Office:
Federal State Budgetary Scientific Institution "V.M. Gorbatov Federal Research Center for Food Systems of Russian Academy of Sciences"
Talalikhina str. 26, Moscow, Russia, 109316

EDITORIAL OFFICE:
Federal State Budgetary Scientific Institution
"V.M. Gorbatov Federal Research Center
for Food Systems of Russian Academy of Sciences"
Talalikhina str. 26, Moscow, Russia, 109316
Tel.: +7-495-676-95-11 extension 300
e-mail: a.zakharov@fncps.ru

The Journal is registered in the Federal Service on Supervision in the sphere of communication industry, information technologies and public communications.
The certificate of registration is
PI № FS 77 – 71610 of 13.11.2017
EL № FS 77 – 72022 of 26.12.2017
Founded in 2018.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License
Free price.
Frequency — 4 issues a year.
Signed print 29.06.2026.
Released from press 30.06.2026.
Circulation — 300 copies. Order № 159.

16+

© FNCPS, 2026
© Authors, 2026

ISSN 2618-9771 (Print)
ISSN 2618-7272 (Online)
DOI-prefix: 10.21323/2618-9771

EDITORIAL BOARD

EDITOR-IN-CHIEF:
Oxana A. Kuznetsova, Doctor of technical sciences, Director, V. M. Gorbatov Federal Research Center for Food Systems of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

DEPUTY EDITOR-IN-CHIEF:
Andrey B. Lisitsyn, Doctor of technical sciences, Professor, Academician of RAS, Scientific supervisor, V. M. Gorbatov Federal Research Center for Food Systems of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

DEPUTY EDITOR-IN-CHIEF:
Anastasiya A. Semenova, Doctor of technical sciences, Professor, Deputy Director, V. M. Gorbatov Federal Research Center for Food Systems of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

SCIENTIFIC EDITORS:
Ivan F. Gorlov, Doctor of agricultural sciences, Professor, Academician of RAS, Scientific supervisor of Povolzhskiy Research Institute of Production and Processing of Meat and Dairy Products, Volgograd, Russia
Ivan Nastasijevic, Doctor, Associate Director, Institute of Meat Hygiene and Technology, Belgrad, Serbia
Takeda Shiro, Associate Professor, Laboratory of Food Science School of Veterinary Medicine, Azabu University, Sagamihara, Japan
Aleksandr Yu. Prosekov, Doctor of technical sciences, Professor, Corresponding member of RAS, Rector, Kemerovo State University, Kemerovo, Russia
Natalia A. Gorbunova, Candidate of technical sciences, Academic Secretary, V. M. Gorbatov Federal Research Center for Food Systems of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
Arif Nur Muhammad Ansori, Doctor, Doctor in Veterinary Sciences, Researcher, Universitas Airlangga, Surabaya, Indonesia
Tarek Gamal Abedelmaksoud, PhD of Food Science, Associate Professor, Food Science Department, Faculty of Agriculture, Cairo University, Giza, Egypt

PRODUCTION EDITOR:
Aleksandr N. Zakharov, Candidate of technical sciences, Senior research worker, Head of the Department of Editorial and Publishing, V. M. Gorbatov Federal Research Center for Food Systems of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

MEMBERS OF THE EDITORIAL BOARD:
Liubov S. Abramova, Doctor of technical sciences, Professor, Deputy Director of the Department, Russian Federation Research Institute of Fishery and Oceanography, Moscow, Russia
Baiana A. Bazhenova, Doctor of technical sciences, Professor, Professor of the chair «Meat and canned product technology» of East Siberia State University of Technology and Management, Ulan-Ude, Russia
Aram G. Galstyan, Doctor of technical sciences, Academician of RAS, Director, All-Russian Dairy Research Institute, Moscow, Russia
Irina M. Donnik, Doctor of biological sciences, Professor, Academician of RAS, Vice president of RAS, Moscow, Russia
Ivan A. Evdokimov, Doctor of technical sciences, Professor, Head of the chair "Technology of milk and dairy products", North-Caucasus Federal University, Stavropol, Russia
Andrey N. Ivankin, Doctor of Chemical Sciences, Professor,Head of the chair of Chemistry, Mytishchi branch of Bauman Moscow State Technical University, Mytischi, Moscow region, Russia
Alla A. Kochetkova, Doctor of technical sciences, Professor, Head of the «Laboratory of food biotechologies and specialized products», Federal Research Centre of nutrition, biotechnology and food safety, Moscow, Russia
Natal'ya G. Mashentseva, Doctor of technical sciences, Professor RAS, Professor, Chair of Biotechnology and Technology of Products of Bioorganic Synthesis, Moscow State University of Food Production, Moscow, Russia
Sergey A. Miroshhikov, Doctor of biological sciences, Professor, Corresponding member of RAS, Rector, Orenburg State University, Orenburg, Russia
Liubov V. Rimareva, Doctor of technical sciences, Professor, Academician of RAS, Chief Researcher, All-Russian Scientific Research Institute of Food Biotechnology — branch Federal Research Centre of nutrition, biotechnology and food safety, Moscow, Russia
Andrey N. Petrov, Doctor of technical sciences, Professor, Academician of RAS, Director, All-Russian Research Institute of Canning Technology — Branch of V. M. Gorbatov Federal Research Center for Food Systems of RAS, Vidnoe, Moscow region, Russia
Maxim B. Rebezov, Doctor of agricultural sciences, Professor, Chief Researcher, V. M. Gorbatov Federal Research Center for Food Systems of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
Irina M. Chernukha, Doctor of technical sciences, Professor, Academician of RAS, Head of the Department, V. M. Gorbatov Federal Research Center for Food Systems of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

СОДЕРЖАНИЕ

Ashgan M. Aly , Amera T. Mohammed, Mohamed S. Abbas
PHYSICOCHEMICAL AND TECHNOLOGICAL PROPERTIES OF TORTILLA BREAD PRODUCED FROM MAIZE GRAINS CULTIVATED UNDER DROUGHT CONDITIONS 154

Сотченко Д. Ю., Мартиросян В. В., Костюченко М. Н., Балуян Х. А., Шариков А. Ю., Жиркова Е. В.
ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КРУПЫ ИЗ ЗЕРНА ГИБРИДОВ КУКУРУЗЫ ОТЕЧЕСТВЕННОЙ СЕЛЕКЦИИ ДЛЯ ЭКСТРУЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ 162

Творогова А. А., Казакова Н. В., Ландиховская А. В., Ситникова П. Б., Ермоченков Д. М., Ананьева Н. В.
АСПЕКТЫ УСТАНОВЛЕНИЯ СРОКОВ ГОДНОСТИ И ПОРЧИ МОРОЖЕНОГО. ОБЗОР 171

Ульрих Е. В.
ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА ВЫДЕЛЕНИЯ ФРАКЦИИ СКВАЛЕНА ИЗ ЛЮПИНА БЕЛОГО 181

Amira Sakhraoui, Noureddine Touati, Soraya Hihat, Bilal Madagh, Federica Blando
ANTIMICROBIAL EVALUATION OF THE HYDRO-SOLUBLE EXTRACT FROM *OPUNTIA FICUS-INDICA* SEEDS AGAINST BACTERIAL AND FUNGAL PATHOGENS 192

Свириденко Г. М., Захарова М. Б., Мамыкин Д. С.
РИСКИ СНИЖЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ПРОДУКТОВ СЫРОДЕЛИЯ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СОСТАВА АНТИБИОТИКОВ В МОЛОКЕ 199

Панкратов И. В., Куликов Д. С., Королев А. А., Калугина З. И., Буданов А. В.
БИОХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА СУБЛИМИРОВАННОГО СОКА И ВЫЖИМКИ РОСТКОВ ПШЕНИЦЫ ИЗ ЗЕРНА СОРТА «ЮБИЛЕЙНАЯ 60» 208

Топникова Е. В., Пчелкина В. А., Данилова Е. С., Пирогова Е. Н., Заболотин Г. Ю.
ВЫЯВЛЕНИЕ ФАЛЬСИФИКАЦИИ МОЛОЧНЫХ ПРОДУКТОВ ГОВЯЖЬИМ ЖИРОМ ПРИ КОМПЛЕКСНОЙ ОЦЕНКЕ ЖИРОВОЙ ФАЗЫ 216

Bunde-Tsegba C. M. , Iornav M. D., Ityotagher P. Aondoakaa, Seember J. Iorver
FUNCTIONAL, NUTRITIONAL, AND SENSORY QUALITY OF BREAD PRODUCED FROM WHEAT-CARROT-DATE (*PHOENIX DACTYLIFERA* L.) COMPOSITE FLOURS 228

Серба Е. М., Крючкова Е. Р., Юраскина Т. В., Римарева Л. В., Гаврилова Д. А., Борщева Ю. А., Оверченко М. Б.
ПОДБОР РАСЫ ДРОЖЖЕЙ ДЛЯ СБРАЖИВАНИЯ ПШЕНИЧНО-ЧЕРНОСМОРОДИНОВОГО СУСЛА В ТЕХНОЛОГИЯХ ЗЕРНО-ФРУКТОВЫХ ДИСТИЛЛЯТОВ 234

Karina I. Shaykhieva, Natalia V. Kraysman, Ildar G. Shaikhiev
THE USE OF TANGERINE PEEL AS A COMPONENT IN FOOD PRODUCTS 241

Ковалёв К. А., Неповинных Н. В.
ПРИМЕНЕНИЕ МИЦЕЛИАЛЬНОГО ГРИБА *ASPERGILLUS ORYZAE* В ПИЩЕВОЙ БИОТЕХНОЛОГИИ 247

Djilali Bouhadi, Hamza Belkhodja, Abdelkader Elouissi, Zouaoui Benattouche, Abderrahmane Remil, Ahmed Hariri
EXTRACTION AND CHARACTERIZATION OF CHICKEN PEPSIN WITH EVALUATION OF ITS MILK-CLOTTING ACTIVITY IN SKIM MILK 254

Посокина Н. Е., Захарова А. И.
СОВРЕМЕННЫЕ ПРЕПАРАТЫ БИОТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ПИЩЕВЫХ СИСТЕМ 261

Bima P. Pratama, Aswin R. Khairullah, Wita Yulianti, Imam Mustofa, Riza Z. Ahmad, Lulum Leliana, s Mohammad Sukmanadi, Nabila R. 'Afifah, Fadhila Utari, Adeyinka O. Akintunde, Fidela D. Agrippina, Muhammad R. F. Hidayat, Bantari W. K. Wardhani, Ikechukwu B. Moses, Dea A. A. Kurniasih, Arif N. M. Ansori
ZIRCONIUM DIOXIDE (ZRO_2) FOR ACTIVE FOOD PACKAGING: PHYSICOCHEMICAL TRAITS, MULTIFUNCTIONAL MECHANISMS, COMPARATIVE ADVANTAGES, SAFETY, AND PROSPECTS 270

Кузнецов М. А., Никитин И. А.
ХЕМОИНФОРМАТИЧЕСКАЯ ПРИОРИТИЗАЦИЯ БИОАКТИВНЫХ СОЕДИНЕНИЙ, АССОЦИИРОВАННЫХ С ХЛЕБНОЙ МАТРИЦЕЙ НА ОСНОВЕ ФАРМАКОЛОГИЧЕСКИХ АННОТАЦИЙ CHEMBL И МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ 282

Ovigueroye Ekayoda, Helen E. Kadiri, Augustine Apiamu, Joel Okpoghono
NUTRITIONAL PROFILES OF *PERSEA AMERICANA* AND *TELFAIRIA OCCIDENTALIS* SEEDS: POTENTIAL APPLICATIONS IN FOOD FORMULATIONS. 294

Мамыкин Д. С., Шухалова О. М., Волкова Т. А., Бородина У. В., Григорьева А. И.
ОЦЕНКА МЕТОДОВ ОСАЖДЕНИЯ БЕЛКОВ ПОДСЫРНОЙ СЫВОРОТКИ ПО ЭФФЕКТИВНОСТИ И ФРАКЦИОННОМУ СОСТАВУ 306

Пухальский Я. В., Лоскутов С. И., Воробьев Н. И., Питти Х. К., Глушаков Р. И., Ситнов В. Ю.
ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ЭКСТРАКТА ЗООГУМУСА НА БИОХИМИЮ И ВЕГЕТАТИВНЫЙ РОСТ СТЕВИИ МЕДОВОЙ (*STEVIA REBAUDIANA*) 316

Купаева Н. В., Чернуха И. М., Трубина М. В., Нестерова М. Д., Кузина М. П.
ОПТИМИЗАЦИЯ УСЛОВИЙ ФЕРМЕНТАТИВНОЙ ЭКСТРАКЦИИ ФЕНОЛЬНЫХ АНТИОКСИДАНТОВ ИЗ ПШЕНИЧНЫХ ОТРУБЕЙ 329

Петров С. М., Подгорнова Н. М.
СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИ ЗНАЧИМЫХ ХАРАКТЕРИСТИК САХАРНОГО СИРОПА И СВЕКЛОВИЧНОЙ МЕЛАССЫ 337

Бурак Л. Ч. , Завалей А. П. , Сапач А. Н.
СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ БЛОКЧЕЙНА И ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ КОНТРОЛЯ БИОПЛЕНКИ В ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ. ОБЗОР 347

Мечтаева Е. В., Васильев П. Н., Никитина Н. А., Журавлева А. З., Ситнов В. Ю.
ВАКУУМНАЯ И КОНВЕКЦИОННАЯ СУШКА НАСЕКОМЫХ ВИДОВ *TENEBRIO MOLITOR* И *ACHETA DOMESTICUS* 357

DOI: https://doi.org/10.21323/2618-9771-2026-9-2-154-161

Received 30.10.2025
Accepted in revised 07.04.2026
Accepted for publication 14.04.2026
© Aly A. M., Mohammed A. T., Abbas, M.S., 2026

Available online at https://www.fsjour.com/jour
Original scientific article
Open access

PHYSICOCHEMICAL AND TECHNOLOGICAL PROPERTIES OF TORTILLA BREAD PRODUCED FROM MAIZE GRAINS CULTIVATED UNDER DROUGHT CONDITIONS

Ashgan M. Aly[1,*], Amera T. Mohammed[2], Mohamed S. Abbas[3]

[1] Bread and Pasta Research Department, Food Technology Research Institute, Agricultural Research Center, Giza, Egypt
[2] Crops Technology Research Department, Food Technology Research Institute, Agricultural Research Centre, Giza, Egypt
[3] Natural Resources Department, Faculty of African Postgraduate Studies, Cairo University, Giza, Egypt

KEYWORDS:
maize, rheological, tortilla bread, sensory, storage-quality

ABSTRACT

Bread production from maize is technologically challenging due to the poor viscoelastic properties of its dough. This study evaluated three maize cultivars cultivated under drought-exposed conditions with calcium foliar fertilization: one Egyptian cultivar (SCP3444, V1) and two early-maturing, high-yielding Nigerian cultivars (Sammaz-35, V2; EVDT, V3). These were compared with their respective control samples (Con1, Con2, Con3) were also evaluated to determine their effects on tortilla bread quality. Physicochemical, chromatic, and rheological properties of maize flour were evaluated, alongside sensory attributes and storage quality (AWRC) of the tortilla bread. Con1 and Con2 exhibited the highest values for 1000-kernel weight, hectoliter weight, and bulk density. The white maize cultivars, Con3 and V3 demonstrated the highest lightness (L) values, while protein content was significantly higher in Con2 and V2. Mineral analysis revealed that V2 had the highest calcium and zinc contents, whereas V3 was richest in iron. Rheological evaluation assessments suggested that V1 flour was optimal for producing softer tortilla bread, which exhibited enhanced tenderness after cooling. The most consumers' acceptable tortilla samples were TCon1, TV1, TCon2, and TV2, which were prepared from yellow maize. TV1 and TCon2 recorded the highest weight after baking. TV2 demonstrated the greatest loaf diameter increase before and after baking, while TV3 recorded the highest lightness and TCon2 the highest yellowness. For dietary reference intake in children (3–10 years), TV2 provided the highest contributions to daily requirements for protein, calcium, and zinc, whereas TV3 had the highest iron content. Regarding storage, TV1 showed the highest AWRC, indicating superior freshness and moisture retention, reflecting extended shelf life. These results highlight the potential for using drought-tolerant, calcium-fertilized maize cultivars to improve the technological, nutritional, and storage quality of tortilla bread.

Поступила 30.10.2026
Поступила после рецензирования 07.04.2026
Принята в печать 14.04.2026
© Али А. М., Мохаммед А. Т., Аббас М. С., 2026

https://www.fsjour.com/jour
Научная статья
Открытый доступ

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТОРТИЛЬИ, ПРИГОТОВЛЕННОЙ ИЗ КУКУРУЗЫ, ВЫРАЩЕННОЙ В УСЛОВИЯХ ЗАСУХИ

Али А. М.[1,*], Мохаммед А. Т.[2], Аббас М. С.[3]

[1] Отдел исследований хлеба и макаронных изделий, Научно-исследовательский институт пищевых технологий, Центр сельскохозяйственных исследований, Гиза, Египет
[2] Научно-исследовательский отдел технологии выращивания сельскохозяйственных культур, Научно-исследовательский институт пищевых технологий, Центр сельскохозяйственных исследований, Гиза, Египет
[3] Кафедра природных ресурсов, факультет последипломного образования стран Африки, Каирский университет, Гиза, Египет

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:
кукуруза, реологические свойства, тортилья, органолептические свойства, качество при хранении

АННОТАЦИЯ

Производство хлебобулочных изделий из кукурузы представляет собой технологически сложную задачу из-за низких вязкоупругих свойств кукурузного теста. В данном исследовании оценивались три сорта кукурузы, выращиваемых в засушливых условиях, с внесением внекорневой подкормки кальцием: один египетский сорт кукурузы (SCP3444, V1) и два раннеспелых высокоурожайных нигерийских сорта кукурузы (Sammaz-35, V2; EVDT, V3). Их сравнивали с соответствующими контрольными образцами, обозначенными как Con1, Con2, Con3, свойства которых также оценивались для определения влияния условий выращивания на качество тортильи. Были оценены физико-химические, хроматические и реологические свойства кукурузной муки, а также органолептические характеристики и качество продукта при хранении (щелочную водоудерживающую способность). Сорта кукурузы под кодом Con1 и Con2 показали самые высокие значения массы 1000 зерен, массы в гектолитре и насыпной плотности. Белые сорта кукурузы, Con3 и V3, продемонстрировали самые высокие значения светлости (L), в то время как содержание белка было значительно выше в сортах под обозначением Con2 и V2. Минеральный анализ показал, что мука из кукурузы под обозначением V2 имела самое высокое содержание кальция и цинка, тогда как мука из V3 была наиболее богата железом. Реологические исследования показали, что мука из V1 оптимальна для производства более мягкой тортильи, которая после охлаждения демонстрировала повышенную нежность. Наиболее потребительски приемлемыми образцами тортильи были TCon1, TV1, TCon2 и TV2, приготовленные из желтой кукурузы. Тортильи TV1 и TCon2 продемонстрировали наибольший вес после выпечки. TV2 продемонстрировала наибольшее увеличение диаметра лепешки до и после выпечки, в то время как TV3 отличилась наибольшей светлотой, а TCon2 — наибольшей желтизной. Что касается рекомендуемой суточной нормы потребления питательных веществ для детей (3–10 лет), TV2 внесла наибольший вклад в суточную потребность в белке, кальции и цинке, тогда как TV3 имела самое высокое содержание железа. Что касается хранения,

FOR CITATION: **Aly, A. M., Mohammed, A. T., Abbas, M. S.** (2026). Physicochemical and technological properties of tortilla bread produced from maize grains cultivated under drought conditions. *Food Systems,* 9(1), 154–161. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2026-9-2-154-161

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: **Али, А. М., Мохаммед, А. Т., Аббас, М. С.** (2026). Физико-химические и технологические свойства тортильи, приготовленной из кукурузы, выращенной в условиях засухи. *Пищевые системы*, 9(1), 154–161. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2026-9-2-154-161

TV1 показала самое высокое значение щелочной водоудерживающей способности, что указывает на превосходную свежесть и влагоудержание, отражающие способность данной тортильи выдерживать более длительный срок хранения. Эти результаты подтверждают потенциал использования засухоустойчивых, удобренных кальцием сортов кукурузы для улучшения технологических свойств, питательной ценности и продолжительности хранения тортилий.

1. Introduction

Maize (*Zea mays* L.) is one of the world's most important cereal crops, providing a major source of food and raw material for various industrial applications. Originally domesticated in Central America, maize was introduced to Europe and the other continents in the late 15th century. Due to its high adaptability, farmers have developed a vast range of genetically diverse maize varieties with various traits, adaptations, and scopes of applications. Today, maize is primarily used for animal feed in Europe. However, over the past five centuries, numerous maize-based food products have also emerged and become a part of traditional European cuisine [1]. In Egypt, the estimated maize production for 2023/2024 (October–September) is approximately 7.2 million metric tons (MMT), reflecting a decline of nearly 3.2 % compared to 2022/2023. This reduction is primarily attributed to elevated temperatures during the growing season and increased insect infestation, which adversely affected kernel development and led to lower overall yields across the region between July and August [2]. Also, it's growing can be combined with other crops to produce staple foods that meet health standards, therefore improving the quality of life for people with gluten intolerance [3].

Drought defined as insufficient water availability, is one of the most common abiotic stresses affecting agriculture, especially in arid and semi-arid regions. Its occurrence and severity are forecast to increase as a result of global climate change, posing a serious threat to global crop productivity [4]. Drought is considered one of the most critical stress factors, which significantly reduces the yield and quality of major cereal crops [5]. Along with climate change leading to more frequent and severe droughts in many agricultural areas, a primary objective of adaptation strategies is to minimize the impact of drought on crop yields. Maize, in particular, is highly sensitive to water stress and has been the focus of numerous management improvements, including the recent development and adoption of drought-exposed varieties [6]. Maize is tall and broad-leaved plant, so extreme drought stress due to water deficit during its vegetation can cause leaves to curl, impede the growth and reproduction of maize. In addition, it can inhibit the induction of flowering in male flowers and cause factors that interfere with pollen development, which can greatly affect seedling formation, early plant growth, proper photosynthesis, reproductive growth, and yield [7]. Foliar application of calcium significantly improved the ability of maize plants to cope with drought stress. Among the evaluated cultivars, EVDT and SC-P3444 demonstrated the greatest tolerance to water deficiency, followed by Sammaz-35 [8]. Maize tortilla bread consumption varies significantly across regions. In the United States, the average annual per capita consumption reaches approximately 6 kg, while in Europe it is considerably lower, at around 0.3 kg per person [9]. Tortilla bread represents a fundamental component of the Mexican diet, with an average annual per capita consumption of 75 kg. They supply around 38.8 % of daily protein needs, 49.1 % of calcium requirements, and 45.2 % of total daily caloric intake. Owing to their widespread popularity and flavors versatility, tortilla bread holds great potential as a vehicle for delivering bioactive and nutrient-rich compounds, which could play a vital role in reducing famine and malnutrition while promoting public health [10]. Traditionally, tortilla bread is crafted from native maize varieties and produced by ancient methods [11]. The main drawback of the nutritional composition of maize tortilla is the low quality of proteins attributed to its reduced lysin and tryptophan amino acids concentrations [12].

This study also aimed to evaluate the physical, chemical, and rheological properties of early-maturing, high-yielding maize varieties cultivated under drought conditions with foliar calcium fertilization and assess their suitability for producing high-quality gluten-free tortilla bread for individuals with gluten sensitivity or celiac disease. Quality assessment included sensory evaluation, storage stability, and the nutritional composition of the tortilla bread. The results may also contribute to guiding the selection of maize genotypes with improved nutritional and functional traits for their potential use in maize cultivar breeding programs aimed at improving maize quality under stress conditions.

2. Objects and methods

2.1. Objects

Three maize cultivars were used in this study: an Egyptian commercial cultivar (SC-P3444) and two early-maturing, high-yielding Nigerian cultivars (Samaz-35 and EVDT), which were obtained from Agricultural Experimental and Research Station, Faculty of Agriculture, Cairo University, Giza, Egypt. These cultivars were cultivated under natural conditions as a control samples, and were relevantly coded as Con1, Con2, and Con3, and the same cultivars were grown under drought-exposed conditions using calcium foliar fertilization and were coded as V1, V2, and V3. Salt, baking soda, sugar, and oil were purchased from a local market, Cairo, Egypt. All other used chemicals were of the analytical reagent grade.

2.2. Weight of 1000- kernels

The 1000-kernel weight was measured by weighing 100 cleaned kernels in triplicate and extrapolating the average weight by the standard methods of ISO 520 [13].

2.3. Hectoliter weight

Hectoliter weight was determined by standard methods of ISO 7971-1 [14], and expressed as Kg/hL.

2.4. Bulk density

A maize kernel was placed in a 100 ml graduated cylinder, and both its volume and weight were measured. Bulk density was then calculated according to the method described by Wongsa et al. [15] as follows:

$$\text{Bulk density} = \frac{\text{weight of maize}\,(\text{g})}{\text{volume of maize}\left(\text{cm}^3\right)}. \quad (1)$$

2.5. Maize kernels preparation

The initial moisture content of whole maize kernels was estimated using a laboratory oven (Bongard, France) at 105 °C for 3 hours until the weight was constant, according to the AOAC [16] standard method. Moisture content of maize kernels was adjusted to 14 % by adding the calculated amount of water using the equation (2). The calculated water was added individually to maize grains placed in polyethylene bags. Each bag was manually mixed for 3 minutes to ensure uniform moisture distribution. After sealing, the bags were stored at 25 °C for 16 hours to allow moisture equilibration throughout the grains, following the method of Chowdhury et al. [17] with some modification. The kernels were then partially dried by spreading them on trays and air-drying them for 1 hour. The kernels were crushed to estimate the final moisture content using the same method as for the initial moisture content. The conditioned grains were then milled using a laboratory fractionation roller mill (Brabender Duisburg, Germany) to produce fine whole meal flour (approximately 80 mesh). The flour was packed in polyethylene bags and stored in a deep freezer until use.

$$Q = \frac{W_a\left(M_b - M_i\right)}{100 - M_b}, \quad (2)$$

where: Q — is the amount of water added, g; W_a — is the sample initial mass, g; M_i — is the initial moisture content of the sample, %; M_b — is the desired moisture content of the sample, %.

2.6. Color measurement

The color of maize kernel flour and the color of tortilla bread were evaluated following the procedure described by McGuire [18] using a hand-held tristimulus reflectance colorimeter model CR-400, Konica Minolta, Japan). The measured color parameters included L* (ranging from 0 = black to 100 = white), a* (indicating the range from red [+] to green [–] axis), and b* (indicating the range from yellow [+] to blue [–] axis).

2.7. Chemical composition

Crude protein, fat, crude fiber, and ash content of maize flour and tortilla bread were determined according to AOAC [16]. Carbohydrate was calculated by difference on dry weight

$$\text{Available carbohydrate} = 100 - (\textit{protein} + \textit{fat} + \textit{fiber} + \textit{ash}) \quad (3)$$

2.8. Minerals content

The contents of Ca, Zn, and Fe in the maize flour and tortilla bread were analyzed using an atomic absorption spectrophotometer Model 300 (Perkin Elmer, USA), following the procedures outlined by AOAC [16].

2.9. Rheological properties (Mixolab analysis)

The rheological properties of maize flour dough were analyzed using a device Mixolab (Chopin Technologies, France). The measured parameters included water absorption (C1), dough development time, dough

stability, protein weakening (C2), starch gelatinization (C3), hot starch paste stability (C4), and retrogradation (C5), following the standard method AACC [19].

2.10. Tortilla bread preparation

Six tortilla bread samples (TCon1, TV1, TCon2, TV2, TCon3, and TV3) were prepared as outlined in Table 1, following the method described by Rendón-Villalobos et al. [20] with slight modifications. The samples were prepared using 100 % maize flour derived from the same maize cultivars cultivated under normal conditions (control groups) and drought-exposed conditions with calcium foliar fertilization (experimental groups). The maize flour was combined with water to form dough, which was gelatinized over direct heat for approximately 10–15 minutes and then allowed to cool. Subsequently, fat, salt, and hydrocolloids were incorporated, and the mixture was left to rest for 10 minutes. The dough was then divided into 50 g portions and shaped into discs approximately 2 mm thick and 15 cm in diameter. The samples were baked on a hot grill at around 250 °C for 27 seconds on one side and 30 seconds on the other, then turned on both sides until puffed, and finally cooled to room temperature. After sensory evaluation, the tortilla bread was packaged in polyethylene bags and stored at room temperature for 24, 48, and 72 hours before analysis.

Table 1. **Formula of tortilla bread**

Таблица 1. **Рецепт тортильи**

Ingredients	Formula, g/100 g					
	TCon1	TV1	TCon2	TV2	TCon3	TV3
Maize flour	100	100	100	100	100	100
Salt	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
Oil	6	6	6	6	6	6
Baking soda (sodium bicarbonate)	4	4	4	4	4	4
Xanthan gum	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
Water	The amount of water is relevant to the amount of its absorption using the Mixolab device					

2.11. Total caloric value (TCV)

The total caloric value of tortilla bread was calculated by Marero et al. [21], as follows:

$$\text{TCV (kcal/100 g)} = 4\,(\text{Protein}) + 4\,(\text{Carbohydrate}) + 9\,(\text{Fat}). \quad (4)$$

2.12. Sensory evaluation of tortilla bread

The sensory evaluation of six tortilla bread samples was conducted by a trained panel consisting of 10 members selected from the staff of the Food Technology Research Institute, Agricultural Research Center, Giza, Egypt. The evaluation of tortilla bread included assessments of its general appearance, color, roundness (sphericity), taste, flavor, which made up the overall consumer acceptability, with each attribute scored 20, resulting in a total score of 100, as described by Cardona-Herrera et al. [22].

2.13. Physical characteristics of tortilla bread

Physical properties of six tortilla bread samples were evaluated for their loaves weight (g), and their diameter (cm). Tortilla bread weight was measured using a digital laboratory weighing scale (Model: Sartorius TE6101, Germany), while diameter was evaluated with a digital Vernier Caliper (Fuzhou Conic Industrial Co., Ltd., China) according to Enríquez-Castro et al. [23].

2.14. Dietary reference intake (DRI) of tortilla bread

The dietary reference intake was estimated according to DRI [24].

2.15 Alkaline water retention capacity (AWRC) of tortilla bread:

Alkaline water retention capacity (AWRC) was determined according to Licciardello et al. [25] with some modifications and calculation as follows.

$$\text{AWRC}\,(\%) = \frac{W_2 - W_1}{W_1} \times 100 \quad (5)$$

where: W_1 — is the weight of tube containing the dry sample; W_2 — is the weight of tube containing the dripped sample.

Analyses were conducted in duplicate at each day of the experimental period (0, 1, 2, and 3 days).

2.16. Statistical analysis

Data were analyzed using F. test via one-way ANOVA ($P \leq 0.05$), Duncan's multiple range tests for means comparison was applied using Costas statistical software based on a probability level according to Steel and Torrie [26].

3. Results and discussion

3.1. Physical characteristics and color of maize cultivars

Table 2 provides an overview of the physical and color characteristics of various maize cultivars. Physical parameters of the maize kernel are critical in selecting maize cultivar suitable for tortilla bread production due to their influence on processing functionality and cooking behavior [27]. The 1,000-kernel weight varied between 262 and 339 g, while the hectoliter weight ranged from 131 to 173 kg/hl. Notably, the cultivars cultivated under drought-exposed conditions using calcium foliar fertilization (V1, V2, and V3) exhibited lower 1,000-kernel weight, hectoliter weights, and bulk density than their respective control counterparts cultivated under normal conditions (Con1, Con2, and Con3). Bulk density was observed to range from 2.62 g/cm^3 for V3 to 3.40 g/cm^3 for Con1. Among the cultivars cultivated under drought-exposed conditions using calcium foliar fertilization, V1 featured the highest 1,000-kernel weight, hectoliter weight, and bulk density. These findings align with the previous studies [8,28,29].

Table 2 illustrates the color parameters of maize samples, including lightness (L*), redness (a*), and yellowness (b*). Significant differences were observed in lightness values between the control maize cultivars and those cultivated under drought-exposed conditions with calcium foliar fertilization. Among the samples, white maize cultivars Con3 and V3 featured the highest L* values (87.96 and 87.87, respectively) and the lowest redness (0.89 and 0.91, respectively), compared to the other samples. Yellowness (b*) values, which were notably higher in Con1, V1, Con2, and V2, indicate their yellow color. The observed differences in color among maize cultivars may be attributed to genetic variation [30]. Kljak et al. [31] found a strong positive correlation between total carotenoid content and the b* (yellowness) value.

3.2. Chemical composition and mineral content for maize cultivars

The chemical composition and mineral content of different maize cultivars are presented in Table 3. The data reveal significant differences between the maize cultivar under drought-exposed conditions using calcium foliar fertilization (V1, V2, and V3) and their controls, which were cultivated under normal conditions (Con1, Con2, and Con3). All maize cultivars cultivated under drought-exposed conditions using calcium foliar fertilization (V1, V2, and V3) exhibited higher protein, fiber, and fat contents, Ca, Zn, and Fe, while available carbohydrate content decreased compared to their respective controls (Con1, Con2, and Con3). Protein content was significantly higher in the cultivars Con2 and V2, reaching 9.44 % and 9.89 %, respectively, while the lowest protein content (6.35 %) was observed in the cultivar Con3. Maize cultivars Con1, V1, V2, and V3 exhibited the highest ash content. V1 also exhibited the highest crude

Table 2. **Physical characteristics and color of maize cultivars**

Таблица 2. **Физические характеристики и цвет сортов кукурузы**

	Physical characteristics			Color		
	1000-weight Kernel, g	Hectoliter weight, kg/hl	Bulk density, g/cm^3	L*	a*	b*
Con1	337.5 ± 0.5^a	173.0 ± 0.71^a	3.40 ± 0.08^a	84.41 ± 0.91^b	−1.84 ± 0.02^c	20.27 ± 0.38^a
V1	308.75 ± 0.25^b	154.37 ± 0.44^b	3.08 ± 0.09^b	84.29 ± 0.77^b	−1.94 ± 0.02^d	20.51 ± 0.45^a
Con2	339.0 ± 0.33^a	169.5 ± 0.50^a	3.39 ± 0.01^a	82.33 ± 0.12^c	−1.69 ± 0.01^a	20.01 ± 0.69^a
V2	274.0 ± 0.71^{cd}	137.0 ± 0.75^{cd}	2.76 ± 0.11^c	82.78 ± 0.01^c	−1.76 ± 0.03^b	19.61 ± 0.53^a
Con3	277.75 ± 0.55^c	138.87 ± 0.60^c	2.77 ± 0.02^c	87.96 ± 0.64^a	0.89 ± 0.01^e	10.47 ± 0.39^b
V3	262.0 ± 0.44^d	131.0 ± 0.55^d	2.62 ± 0.03^d	87.87 ± 0.45^a	0.91 ± 0.01^e	10.51 ± 0.35^b

Con1, Con2, and Con3 as control samples of three cultivars as follows: SCP3444, Sammaz-35, and EVDT, respectively. V1, V2, and V3 are three cultivars cultivated under drought-exposed conditions using calcium foliar fertilization as follows: SCP3444, Sammaz-35, and EVDT, respectively. Means with different letters in the same column are significantly different at $P \leq 0.05$.

Table 3. **Chemical composition (g/100g sample) and mineral content (mg/100g) for maize flour**
Таблица 3. **Химический состав (г/100 г образца) и содержание минералов (мг/100 г) в кукурузной муке**

	Chemical composition, g/100 g					Mineral content, mg/100 g		
	Protein	Ash	Crude fiber	Fat content	Carbohydrate (AC)	Ca	Zn	Fe
Con1	6.81 ± 0.20^{bc}	1.76 ± 0.08^{a}	1.38 ± 0.06^{b}	3.56 ± 0.16^{cd}	86.49 ± 0.29^{b}	51.61 ± 0.15^{d}	4.13 ± 0.02^{b}	2.89 ± 0.01^{e}
V1	7.10 ± 0.19^{b}	1.79 ± 0.01^{a}	1.56 ± 0.09^{a}	3.66 ± 0.04^{c}	85.89 ± 0.19^{bc}	61.15 ± 0.55^{b}	4.27 ± 0.13^{ab}	3.28 ± 0.02^{d}
Con2	9.44 ± 0.09^{a}	1.61 ± 0.01^{ab}	1.23 ± 0.02^{d}	3.81 ± 0.55^{b}	83.91 ± 0.49^{d}	51.11 ± 0.21^{d}	4.09 ± 0.11^{b}	2.84 ± 0.04^{e}
V2	9.89 ± 0.13^{a}	1.75 ± 0.27^{a}	1.26 ± 0.01^{c}	4.54 ± 0.54^{a}	82.56 ± 0.56^{e}	67.86 ± 0.11^{a}	4.35 ± 0.26^{a}	5.59 ± 0.11^{c}
Con3	6.35 ± 0.11^{c}	1.42 ± 0.02^{b}	1.25 ± 0.07^{d}	3.84 ± 0.13^{b}	87.14 ± 0.24^{a}	38.46 ± 0.22^{e}	3.53 ± 0.05^{c}	7.41 ± 0.13^{b}
V3	7.01 ± 0.11^{b}	1.71 ± 0.10^{a}	1.32 ± 0.05^{c}	4.40 ± 0.39^{ab}	85.56 ± 0.31^{c}	57.21 ± 0.11^{c}	4.32 ± 0.12^{ab}	10.15 ± 0.0^{a}

Con1, Con2, and Con3 as control samples of three cultivars as follows: SCP3444, Sammaz-35, and EVDT, respectively. V1, V2, and V3 are three cultivars cultivated under drought-exposed conditions using calcium foliar fertilization as follows: SCP3444, Sammaz-35, and EVDT, respectively. Means with different letters in the same column are significantly different at $P \leq 0.05$. AC: available carbohydrate.

fiber content at 1.56%. Fat content was significantly higher in cultivar V2 (4.54%) and the lowest in Con1 (3.56%). Con3 recorded the highest available carbohydrate levels among the cultivars, whereas V2 showed the lowest. The highest levels of these minerals were recorded in V2, with 67.86 mg/100 g for Ca and 4.35 mg/100 g for Zn, while the highest Fe content (10.15 mg/100 g) was found in V3. These results were close to the results of Naeem et al. [32] who indicated that the foliar application of calcium under water deficit conditions improved the nutrient content of grains, increasing the nitrogen, calcium, iron, and zinc contents of grains. Likewise, foliar calcium spraying on maize leaves reduced oxidative damage and maintained nitrogen metabolism, which increased protein content under stress [8].

3.3. Rheological properties (Mixolab analysis) of maize flour

The rheological behavior of different maize cultivars cultivated under drought-exposed conditions using calcium foliar fertilization (V1, V2, V3) and Con1 sample as the control was investigated using the Mixolab. The rheological characteristics of dough are presented in the Table 4. Mixolab results revealed significant differences between the studied maize cultivars. Water absorption (WA) is a key factor influencing dough properties and the baking process, as it directly impacts the volume and quality of the baked products. In this study, WA ranged from 51.90% to 60.80%. V2 sample exhibited the highest value (60.80%), compared to the other samples. This suggests that V2 flour possesses a higher hydration capacity, likely due to its greater protein content or broken-down starch content, both of which strongly bind water. These findings align with Hadnadev et al. [33] and Moreira et al. [34], who reported that increased WA results from protein molecules binding water until a suitable consistency is reached. Similarly, Xu et al. [35] and Awolu [36] noted that protein-rich flour absorb more water than low-protein or starch-rich systems. Variations in WA can also be attributed to grain hardness, damaged starch levels, protein content, arabinoxylan concentration, and particle size [37].

Dough development time (DDT) is defined as the interval from the beginning of water addition to the point at which the dough reaches optimal texture. Among the samples, V2 exhibited the longest DDT (1.63 min), indicating that it required more time for complete hydration compared to the others [38]. A longer DDT reflects the formation of a stronger protein network, which is associated with improved dough handling properties [39]. In contrast, the other samples (Con1, V1, V3) showed equal DDT values of 1.28 min. These values are comparable to those reported for certain gluten-free commercial flours, such as rice flour (1.13 min) [34].

Stability time (ST) measures the dough's resistance to kneading, reflecting its ability to withstand mechanical mixing and thermal stress without structural breakdown. In the present study, ST values varied significantly among the samples, with V2 exhibiting the highest value (6.90 min) and Con1 the lowest (3.79 min). The longer ST observed in V2 indicates superior dough stability, which is advantageous for maintaining dough integrity during processing. Such resistance to mechanical breakdown is particularly desirable in tortilla production, where an elastic and cohesive dough properties are essential for achieving optimal texture and kneading properties [38,40].

Maximum torque (C1) was uniform in all samples (1.12 Nm) but Con1, which was slightly lower (1.10 Nm).

C2 torque represents the protein weakening phase, indicating the extent to which the protein network resists degradation under combined mechanical and thermal stress. In this study, V2 exhibited the highest C2 value (0.89 Nm), followed closely by V1 (0.88 Nm), while Con1 recorded the lowest (0.84 Nm). A higher C2 value reflects greater thermal stability and integrity of the protein network, which contributes to improved dough strength and handling during processing [41].

C3 torque reflects starch gelatinization, representing the swelling capacity of starch granules and the resulting changes in dough functional and rheological properties during heat processing relative to protein stability. V2 had the highest gelatinization peak (2.12), showing better starch swelling capacity. This enhanced gelatinization potential may contribute to increased product volume and improved crumb texture in the baked goods, as starch swelling plays a critical role in gas retention and final product quality. The increase in C3 torque is an indicator of starch gelatinization during heating and cooking [42]. The decrease in C3 torque could be due to the non-starch components (lipids, proteins, and dietary fibers) present in the flour that can compete with starch for water absorption, thus limiting the swelling and gelatinization of starch during cooking [43].

C4 torque measures hot gel stability, reflecting the ability of gelatinized starch to withstand high temperatures without structural breakdown. The gelatinized starch stability (C4) was maintained at 2.89 Nm in all samples except V1, which showed a marked decrease to 1.76 Nm. A lower C4 value indicates reduced starch gel stability. Low amylose content can lead to a more fluid gel structure, thereby contributing to the decrease in C4 torque [44].

C5 torque reflects the extent of starch retrogradation during the cooling phase. Among the tested samples, V1 exhibited the lowest degree of starch retrogradation and recrystallization (3.97 Nm), indicating better freshness retention, while Con1 had the highest C5 torque (5.05 Nm), implying faster retrogradation and reduced shelf-life quality, which is undesirable for tortilla bread due to reduced freshness. The reduction in retrogradation may be influenced by particle size, where smaller particle sizes enhance α-amylase activity, thereby reducing the C5 value. As a result, starch retrogradation is limited, contributing to improved bread freshness retention [44]. The long shelf life of a product is correlated with its low retrogradation value [45]. Retrogradation is influenced the amylose/amylopectin ratio, and the average chain length of amylose and amylopectin [41]. The Mixolab evaluation in this study indicates that V1 is suitable for producing softer tortilla bread with extended flexibility. This is attributed to its low C5 value, which promote the production of soft, elastic tortilla bread that maintain its tenderness after cooling.

Table 4. **Mixolab parameters of maize flour**
Таблица 4. **Показатели кукурузной муки, измеренные устройством Mixolab**

Mixolab parameters	Con1	V1	V2	V3
WA, %	51.90^{d}	58.80^{b}	60.80^{a}	53.80^{c}
DDT, min	1.28^{b}	1.28^{b}	1.63^{a}	1.28^{b}
ST, min	3.79^{d}	5.22^{b}	6.90^{a}	4.79^{c}
C1 torque, Nm	1.10^{b}	1.12^{a}	1.12^{a}	1.12^{a}
C2 torque, Nm	0.84^{d}	0.88^{b}	0.89^{a}	0.85^{c}
C3 torque, Nm	1.85^{d}	1.88^{b}	2.12^{a}	1.86^{c}
C4 torque, Nm	2.89^{a}	1.76^{b}	2.89^{a}	2.89^{a}
C5 torque, Nm	5.05^{a}	3.97^{c}	4.45^{b}	4.45^{b}

WA — water absorption (14% moisture basis); DDT — dough development time; ST — stability time; C1 torque — maximum dough torque to determine water absorption; C2 torque — protein weakening as a function of mechanical work and temperature; C3 torque — starch gelatinization; C4 torque — hot gel stability; C5 torque — starch retrogradation in the cooling phase.
Con1: the SCP3444 cultivar as control sample. V1, V2, and V3: three cultivars cultivated under drought-exposed conditions using calcium foliar fertilization as follows: SCP3444, Sammaz-35, and EVDT, respectively. Means with different letters in the same column are significantly different at $P \leq 0.05$.

3.4. Sensory evaluation of tortilla bread

Tortilla bread is considered an excellent source of energy due to its high carbohydrate content. Moreover, their growing popularity is attributed to their suitability as a gluten-free food option, thus making them particularly beneficial for the individuals with gluten intolerance or celiac disease [46]. Table 5 shows the sensory attributes of tortilla bread samples made from different maize cultivars. The results indicate that the most acceptable tortilla bread samples were TCon1, TV1, TCon2, and TV2 prepared from yellow maize cultivars in terms of their appearance, color, and roundness. The highest taste and overall acceptability scores were in TV1, TCon2, and TV2 compared to all samples. In addition, TV1 and TV2 were the most acceptable in terms of odor. Conversely, the white tortilla made from TCon3 and TV3 received the lowest scores across all parameters, with TV3 scoring the least acceptable in all evaluated attributes.

Table 5. **Sensory evaluation of tortilla bread**
Таблица 5. **Органолептические свойства тортильи**

	General appearance (20)	Color (20)	Roundness (20)	Taste (20)	Odor (20)	Overall acceptability (100)
TCon1	19.45^{a}	19.50^{a}	19.45^{a}	19.44^{b}	19.39^{b}	97.23^{b}
TV1	19.85^{a}	19.89^{a}	19.90^{a}	19.85^{a}	19.83^{a}	99.32^{a}
TCon2	19.90^{a}	19.89^{a}	19.90^{a}	19.88^{a}	19.79^{ab}	99.36^{a}
TV2	19.93^{a}	19.80^{a}	19.90^{a}	19.91^{a}	19.89^{a}	99.43^{a}
TCon3	18.56^{b}	17.55^{b}	18.20^{b}	18.10^{c}	17.29^{c}	89.70^{c}
TV3	17.65^{c}	17.35^{b}	18.05^{b}	17.60^{d}	17.33^{c}	87.98^{d}

TCon1, TCon2, and TCon3 are tortilla breads as control samples of three cultivars as follows: SCP3444, Sammaz-35, and EVDT, respectively, and TV1, TV2, and TV3 are tortilla breads of three cultivars cultivated under drought-exposed conditions using calcium foliar fertilization as follows: SCP3444, Sammaz-35, and EVDT, respectively. Means with different letters in the same column are significantly different at $P \leqslant 0.05$.

3.5. Physical properties of tortilla bread

Table 6 shows the physical properties of tortilla bread, including loaf weight and diameter before and after baking, as well as the color measurement after baking. The results indicated no significant differences in the weight of the loaves before baking; however, significant differences were observed after their baking. TCon1 recorded the lowest loaf weight (23.43 g) after baking, while both TV1 and TCon2 recorded the highest weight. Significant differences were observed in loaves diameters before and after baking. TV2 showed the greatest increase in loaf diameter (13.70 cm and 12.06 cm, respectively) before and after baking among all tortilla bread samples. Ahmed et al. [47] reported that the diameter measured before and after baking reflects the dough's ability to expand or resist to shrinking during the loaf formation process.

The color of a food product plays a crucial role in influencing consumer acceptance, purchasing behavior, and decision-making, as the consumers often associate specific colors with particular flavors and perceived quality attributes [48,49]. Table 6 presents the color measurements of tortilla bread after baking. Among the samples, TV3 showed the highest lightness (L = 61.71) and the lowest redness (a* = 0.81), while TCon2 recorded the highest yellowness (b = 41.42). TV1 also showed increased redness (a* = 1.92), indicating a darker, more browned surface. These color variations can be attributed to starch gelatinization and the Maillard reaction between reducing sugars and proteins during baking, both of which contribute significantly to crust formation and the final product appearance [27].

3.6. Chemical composition of tortilla bread

Table 7 shows the chemical composition of tortilla bread prepared from different maize cultivars, revealing significant differences among all samples. Tortilla samples TV1, TV2, and TV3, produced from maize cultivated under drought-exposed conditions with calcium foliar fertilization, showed significantly higher levels of protein, calcium (Ca), zinc (Zn), and iron (Fe) than their counterparts TCon1, TCon2, and TCon3, produced from maize cultivated under normal conditions (control). Among the samples, TCon1 recorded a higher fat content (7.03%), and TV1 showed significantly higher ash and crude fiber contents, reaching 1.63% and 1.82%, respectively. TV2 showed significantly higher levels of protein, calcium, and zinc than the other samples. These findings are consistent with the previous studies [8,32].

TCon3 showed a significant decrease in fat content (3.86%), while it had the highest total carbohydrate content. TV3 increased significantly in iron content among all samples. In addition, lower protein levels were observed in all tortilla bread samples compared to the original maize flour, as shown in Table 3. This decrease is likely caused by protein degradation and structural changes during baking. As the starch gelatinizes, the elevated baking temperatures lead to protein unfolding and aggregation, thereby decreasing the measurable protein fraction in the final product [27,29].

As illustrated in the Figure 1, the highest total caloric values were recorded in tortilla bread made from TCon1 (422.31 kcal/100 g) followed by TV3 (420.21 kcal/100 g), exceeding the other samples.

Table 6. **Physical properties tortilla bread**
Таблица 6. **Физические свойства тортильи**

	Physical properties						
	Before baking		After baking		Color after baking		
	Loaf weight (g)	Diameter (cm)	Loaf weight (g)	Diameter (cm)	L*	a*	b*
TCon1	35.48±0.07^{a}	13.0±0.5^{b}	23.43±0.29^{c}	11.30±0.11^{d}	57.73±0.34^{b}	1.62±0.02^{b}	37.33±0.53^{c}
TV1	36.38±0.30^{a}	12.66±0.28^{b}	26.76±0.41^{a}	11.7±0.23^{b}	59.85±0.04^{ab}	1.92± 0.01^{a}	38.36±0.50^{b}
TCon2	36.25±0.52^{a}	13.23±0.40^{ab}	26.86±0.19^{a}	11.26±0.17^{d}	54.31±0.04^{c}	1.40±0.01^{d}	41.42±0.51^{a}
TV2	36.20±0.55^{a}	13.7±0.43^{a}	25.02±0.39^{b}	12.06±0.25^{a}	54.17±0.53^{c}	1.49±0.02^{c}	35.28±0.47^{d}
TCon3	35.57±0.14^{a}	13.3±0.34^{ab}	23.97±0.25^{bc}	11.66±0.05^{bc}	60.64±0.19^{ab}	1.02±0.01^{e}	25.41±0.45^{f}
TV3	35.54±0.13^{a}	13.06±0.11^{ab}	24.82±0.53^{bc}	11.40±0.10^{cd}	61.71±0.42^{a}	0.81±0.01^{f}	33.65±0.32^{e}

TCon1, TCon2, and TCon3 are tortilla breads as control samples of three cultivars as follows: SCP3444, Sammaz-35, and EVDT, respectively, and TV1, TV2, and TV3 are tortilla breads of three cultivars cultivated under drought-exposed conditions using calcium foliar fertilization as follows: SCP3444, Sammaz-35, and EVDT, respectively. Means with different letters in the same column are significantly different at $P \leqslant 0.05$

Table 7. **Chemical composition of tortilla bread**
Таблица 7. **Химический состав тортильи**

	Chemical composition (g/100g) on dry basis					Mineral content, mg/100 g		
	Protein	Ash	Crude fiber	Fat content	Carbohydrate (AC)	Ca	Zn	Fe
TCon1	6.08±0.27^{d}	1.55±0.01^{b}	1.66±0.16^{b}	7.03±0.14^{a}	83.68±0.11^{d}	31.66±0.11^{f}	3.34±0.23^{d}	1.61±0.11^{d}
TV1	6.75±0.05^{c}	1.63±0.08^{a}	1.82±0.29^{a}	5.33±0.11^{c}	84.47±0.19^{b}	38.44±0.43^{d}	4.17±0.22^{b}	1.84±0.23^{c}
TCon2	9.35±0.39^{b}	1.41±0.01^{d}	1.50±0.12^{c}	4.43±0.10^{d}	83.31±0.19^{de}	46.43±0.09^{c}	3.50±0.18^{c}	1.61±0.12^{d}
TV2	9.79±0.23^{a}	1.41± 0.27^{d}	1.48±0.21^{c}	4.49±0.22^{d}	82.83±0.16^{e}	52.29±0.10^{a}	4.25±0.10^{a}	2.32±0.20^{b}
TCon3	5.98±0.18^{d}	1.38±0.02^{d}	1.33±0.17^{d}	3.86±0.23^{e}	87.45±0.14^{a}	35.46±0.20^{e}	3.45±0.15^{d}	1.19±0.13^{e}
TV3	6.97±0.04^{c}	1.50±0.10^{c}	1.36±0.15^{d}	6.33±0.20^{b}	83.84±0.21^{c}	51.36±0.21^{b}	4.08±0.26^{b}	2.43±0.22^{a}

TCon1, TCon2, and TCon3 are tortilla breads as control samples of three cultivars as follows: SCP3444, Sammaz-35, and EVDT, respectively, and TV1, TV2, and TV3 are tortilla breads of three cultivars cultivated under drought-exposed conditions using calcium foliar fertilization as follows: SCP3444, Sammaz-35, and EVDT, respectively. Means with different letters in the same column are significantly different at $P \leqslant 0.05$. AC: A carbohydrate.

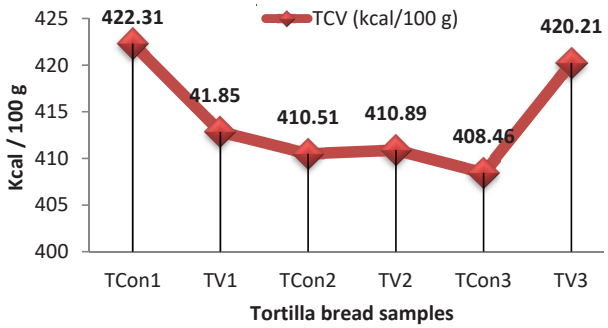


Figure 1. **Total caloric value of tortilla bread**
Рисунок 1. **Общая калорийность тортильи**

3.7. Dietary reference intake (DRI) of tortilla bread

DRI of tortilla bread samples prepared from various maize cultivars, targeting children aged 3–10 years, based on a 100 g portion according to the Dietary Reference Intakes (DRI, 2002/2005) [24], is presented in the Table 8. The TV2 tortilla sample provided the highest protein share, at 34.96% per 100 g, followed by the TCon2 sample, which provided 33.39% per 100 g tortilla based on a recommended dietary allowance of 28 g per day. The TCon3 sample showed the highest share of carbohydrate content, at 67.26% per 100 g of tortilla, based on a recommended dietary allowance of 130 g per day. TCon1 and TV3 showed the highest caloric values, representing 21.11% and 21.01% of the recommended dietary allowance of 2000 kcal/day, respectively [50]. Regarding mineral content, TV2 showed the highest levels of calcium (7.47%) and zinc (75.89%) per 100 g, based on the recommended dietary allowance of 700 mg/day and 5.6 mg/day, respectively. In contrast, TV3 showed the highest iron content, 32.83% per 100 g, based on the recommended dietary allowance of 7.4 mg/day [51].

3.8. Alkaline Water Retention Capacity (AWRC) of tortilla bread

AWRC is a rapid test used to assess the deterioration, retrogradation, or staling, as well as the freshness, of tortilla bread. AWRC shows an inverse correlation with staling and a positive correlation with freshness. A higher AWRC value indicates higher freshness of the bread [52]. Tortilla samples were evaluated after baking (zero time) and after certain storage periods (24, 48, and 72 hours), as illustrated in the Figure 2. The data showed that AWRC values decreased with increasing storage periods in all tortilla samples. AWRC at zero time ranged from (417.12% to 521.75%), after 24 hours (391.54% — 429.86%), after 48 hours (361.17% — 412.42%), and after 72 hours (267.73% –387.48%). Notably, tortilla bread samples TV1, TV2, and TV3 exhibited higher AWRC values compared to their control samples (TCon1, TCon2, and TCon3) throughout all storage periods.TV1 featured the highest AWRC, making it the freshest sample across all time, followed by TV2, and TV3, consistent with the positive correlation between higher AWRC and higher freshness degree. A higher AWRC is positively related to gelatinized starch, while lower values reflect a greater proportion of retrograded starch, which is characterized by reduced water-binding capacity [25]. The higher AWRC and enhanced degree of freshness observed in tortilla samples (TV1, TV2, and TV3) may be attributed to calcium application during the maize cultivation, which helps retain water and reduce kernel desiccation, thereby improving the water-holding capacity of the obtained tortilla bread. Calcium enhanced the water-holding capacity [53].

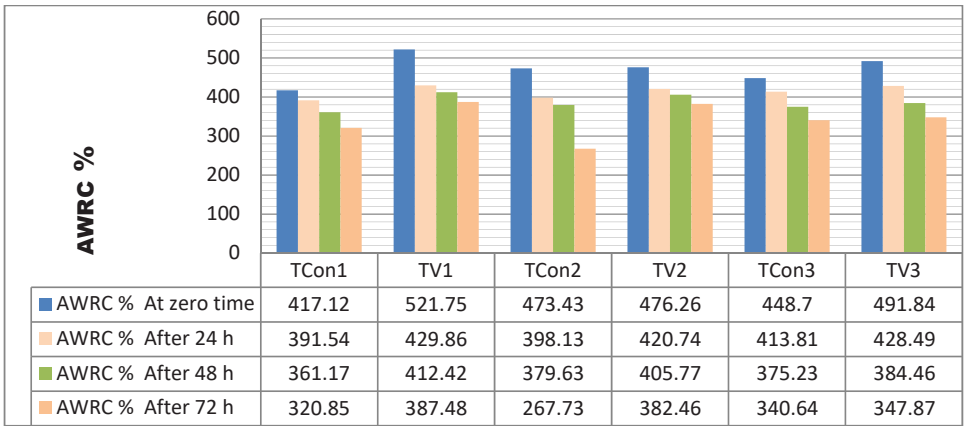
4. Conclusion

This study demonstrated that drought-tolerant maize cultivars cultivated under drought-exposed conditions and treated with calcium foliar fertilization exhibited enhanced protein, fiber, and mineral contents, as well as improved rheological properties. Consequently, these cultivars produced tortilla bread characterized by superior sensory quality, nutritional value, and storage stability. These findings underscore the potential of drought-tolerant maize to decrease dependence on imports of the food, promote sustainable domestic agricultural development, facilitate profitable agricultural production, and support the consumers with gluten intolerance. Further research is required to explore the effects of calcium fertilization on other maize genotypes in varieties breeding programs aimed at improving maize quality under stress conditions and to assess consumer's acceptance of these food products.

Table 8. **Dietary reference intake of tortilla bread / 100 g for children aged (3–10) years**
Таблица 8. **Рекомендуемая суточная норма потребления тортильи в пересчете на 100 г продукта для детей в возрасте от 3 до 10 лет**

DRI	DRI of protein / 100 g	DRI of T.C /100g	DRI of TCV /100g	DRI of Ca/100g	DRI of Zn/100g	DRI of Fe / 100g
TCon1	21.71	64.36	21.11	4.52	59.64	21.75
TV1	24.10	64.97	20.64	5.49	74.46	24.86
TCon2	33.39	63.94	20.52	6.63	62.50	21.75
TV2	34.96	63.71	20.54	7.47	75.89	31.35
TCon3	21.35	67.26	20.42	5.06	61.60	16.08
TV3	24.89	64.49	21.01	7.33	72.85	32.83
DRI**	Based on 28 g/day	Based on 130 g/day	Based on 2000 Kcal/day	Based on 700 mg/day	Based on 5.6 mg/day	Based on 7.4 mg/day

TCon1, TCon2, and TCon3 are tortilla breads as control samples of three cultivars as follows: SCP3444, Sammaz-35, and EVDT, respectively, and TV1, TV2, and TV3 are tortilla breads of three cultivars cultivated under drought-exposed conditions using calcium foliar fertilization as follows: SCP3444, Sammaz-35, and EVDT, respectively.



TCon1, TCon2, and TCon3 are tortilla breads as control samples of three cultivars as follows: SCP3444, Sammaz-35, and EVDT, respectively, and TV1, TV2, and TV3 are tortilla breads of three cultivars cultivated under drought-exposed conditions using calcium foliar fertilization as follows: SCP3444, Sammaz-35, and EVDT, respectively.

Figure 2. **Alkaline Water Retention Capacity (AWRC) of tortilla bread**
Рисунок 2. **Щелочная влагоудерживающая способность тортильи**

REFERENCES

1. Revilla, P., Alves, M.L., Andelkovic, V., Balconi, C., Dinis, I ., Mendes-Moreira, P. et al. (2022). Traditional foods from maize (*Zea mays* L.) in Europe. *Frontiers in Nutrition*, 8, Article 683399. https://doi.org/10.3389/fnut.2021.683399
2. USDA (2023). United State Department of Agriculture, Grain and Feed Update. November 15, 2023, EG2023–0025. Retrieved from https://apps.fas.usda.gov/newgainapi/api/Report/DownloadReportByFileName?fileName=Grain%20and%20Feed%20Update_Cairo_Egypt_EG2023–0025.pdf. Accessed September 7, 2025
3. Arif, M. R., Hussain, A., Najam, A., Ashfaq, M., Bakhtawar, F., Zulfiqar, N. et al. (2025). A review on gluten-free and low-glycemic index bakery products, especially corn based breads, noodles, and multigrain flours. *Discover Applied Sciences*, 7, Article 541. https://doi.org/10.1007/s42452-025-07153-4
4. Qiao, Y., Ren, J., Yin, L., Liu, Y., Deng, X., Liu, P. et al. (2020). Exogenous melatonin alleviates PEG-induced short-term water deficiency in maize by increasing hydraulic conductance. *BMC Plant Biology,* 20, Article 218. https://doi.org/10.1186/s12870-020-02432-1
5. EL Sabagh, A., Hossain, A., Barutçular, C., Islam, M. S., Ahmad, Z., Wasaya, A. et al. (2020). Adverse Effect of Drought on Quality of Major Cereal Crops: Implications and Their Possible Mitigation Strategies. Chapter in a book: Agronomic Crops. Springer Nature Singapore Pte Ltd., 2020. https://doi.org/10.1007/978-981-15-0025-1_31
6. Lobell, D.B., Deines, J.M., Tommaso, S. D. (2020). Changes in the drought sensitivity of US maize Yields. *Nature Food*, 1(11) 729–735. https://doi.org/10.1038/s43016-020-00165-w
7. Kim, K.-H., Lee, B.-M. (2023). Effects of climate change and drought tolerance on maize growth. *Plants*, 12(20), Article 3548. https://doi.org/10.3390/plants12203548
8. Abbas, M., Abdel-Lattif, H., Shahba, M. (2021). Ameliorative effects of calcium sprays on yield and grain nutritional composition of maize (*Zea mays* L.) cultivars under drought stress. *Agriculture*, 11, Article 285. https://doi.org/10.3390/agriculture11040285
9. Artavia, G., Arias-Alvarez, C., Cortes-Herrera, C., Granados-Chinchilla, F. (2022). Physicochemical and sensory assessment of partial maize substitutions with carotenoid-containing non-traditional flours during tortilla preparation. *Cogent Food and Agriculture,* 8(1), Article 2122273. https://doi.org/10.1080/23311932.2022.2122273
10. Rojo-Gutiérrez, E., López-Martínez, L.X., Tirado-Gallegos, J.M., Buenrostro-Figueroa, J.J., García, H. S., Baeza-Jiménez, R. (2025). Fortified maize tortilla: From the traditional Mesoamerican diet to functional food. *Biotecnia,* 27, Article e2269. https://doi.org/10.18633/biotecnia.v27.2269
11. Salinas-Moreno, Y., Galvez-Mariscal, A., Severiano-Perez, P., Vazquez-Carrillo, G., Trejo-Tellez, L.L. (2024). Flavor and TASTE attributes and nutritional insights of maize tortilla bread from landraces of Mexican races. *Heliyon*, 10, Article e28314. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e28314
12. Luna, G. C, San Martin-Gonzalez, F., Mauer, L.J., Liceaga, A.M. (2021). Cricket (*Acheta domesticus*) protein hydrolysates' impact on the physicochemical, structural and sensory properties of tortilla bread and tortilla chips. *Journal of Insects as Food and Feed*, 7(1), 109–120. https://doi.org/10.3920/JIFF2020.0010
13. Method 520 ISO (2010). Cereals and Pulses-Determination of the Mass of 1000 Grains. International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 2010.
14. ISO 7971–1 (2009). Determination of Bulk Density, Called Mass per Hectolitre — Part 1: Reference Method. International Organization for Standardization (ISO): Geneva, Switzerland, 2009.
15. Wongsa, J., Uttapap, D., Lamsal, B. P., Rungsardthong, V. (2016). Effect of puffing conditions on physical properties and rehydration characteristic of instant rice product. *International Journal of Food Science and Technology,* 51(3), 672–680. https://doi.org/10.1111/ijfs.13011
16. AOAC. (2019). Official Methods of Analysis of As-sociation of Official Analytical Chemists inter-national. Association of Official Analytical Chemists. Washington, DC, USA, 2019.
17. Chowdhury, S. T., Clementson, C.L., Baidhe, E. (2024). Investigating the physical properties of maize varieties. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 67(3), 631–639. https://doi.org/10.13031/ja.15769
18. McGuire, R. G. (1992). Reporting of objective color measurements. *HortScience*, *27*(12), 1254–1255.
19. AACC (2000). Approved Methods of Analysis of the American Association of Cereal Chemists International. St Paul, MN, USA, 2000.
20. Rendón-Villalobos, R., Agama-Acevedo, E., Osorio-Díaz, P., Tovar, J., Bello-Pérez, L.A. (2009). Proximal composition and *in vitro* starch digestibility in flaxseed-added maize tortilla. *Journal of the Science of Food and Griculture*, 89, 537–541. https://doi.org/10.1002/jsfa.3490
21. Marero, L.M., Payumo, E.M., Librando, E.C., Laine, W.N., Gopez, M.D., Homma, G.S. (1988). Technology of weaning food formulations prepared from germinated cereals and legumes. *Journal of Food Science*, 53, 1391–1395. https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1988.tb09284.x
22. Cardona-Herrera, R., Pérez-Carrillo, E., de la Rosa-Millán, J., Mirón-Mérida, V. A., Mares-Mares, E., Ozuna, C. (2025). Physical, nutritional, and sensory characterization of tortilla bread formulated with nixtamalized milpa ingredients (*Zea mays* var. Elotes occidentales, *Phaseolus vulgaris* L. var. Negro, and *Cucurbita pepo* L.). *Food Chemistry*, 503, Article 147817. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2025.147817
23. Enríquez-Castro, C. M., Torres-Chávez, P. I., Ramírez-Wong, B., Quintero-Ramos, A., Ledesma-Osuna, A. I., López-Cervantes, J. et al (2020). Physicochemical, rheological, and morphological characteristics of products from traditional and extrusion nixtamalization processes and their relation to starch. *International Journal of Food Science*, 2020(1), Article 5927670. https://doi.org/10.1155/2020/5927670
24. DRI (2002/2005). Dietary Reference Intakes for energy, carbohydrate, fiber, fat, fatty acids, cholesterol, protein, and amino acids. The National Academic Press, Washington, DC, 2002/2005.
25. Licciardello, F., Cipri, L., Muratore, G. (2014). Influence of packaging on the quality maintenance of industrial bread by comparative shelf-life testing. *Food Packaging and Shelf Life*, 1(1), 19–24. http://doi.org/10.1016/j.fpsl.2013.10.001
26. Steel, R. G., Torrie, T. H. (1980). Principles and procedures of statistics. Abiometrical approach". McGraw Hill Book Comp., Inc., New York, USA, 1980.
27. Serna-Saldivar, S.O. (2021). Understanding the functionality and manufacturing of nixtamalized maize products. *Journal of Cereal Science*, 99, Article 103205. https://doi.org/10.1016/j.jcs.2021.103205
28. Kljak, k., Grbesa, D., Darko, A. (2011). Relationships between kernel physical properties and zein content in maize hybrids. *Bulletin of University of Agricultural Sciences and Veterinary Medicine,* 68(1), 188–194. https://doi.org/10.15835/buasvmcn-agr:6439
29. Acosta-Estrada, B. A., Serna-Saldívar, S. O., Chuck-Hernández, C. (2023). Quality assessment of maize tortilla bread produced from landraces and high yield hybrids and varieties. *Frontiers in Nutrition*, 10, Article 1105619. https://doi.org/10.3389/fnut.2023.1105619
30. de Almeida Rios, S., Paes, M.C.D., Cardoso, W.S., Borém, A., Teixeira, F.F. (2014). Color of maize grains and carotenoid profile of importance for human health. *American Journal of Plant Sciences*, 5(6), 857–862. http://doi.org/10.4236/ajps.2014.56099
31. Kljak, K., Drdić, M., Karolyi, D., Grbeša, D. (2012). Pigmentation efficiency of croatian maize hybrids in egg production. *Croatian Journal of Food Technology, Biotechnology nd Nutrition*, 7(Special Issue) 23–27.
32. Naeem, M., Naeem, M. S., Ahmad, R., Ihsan, M. Z., Ashraf, M. Y., Hussain, Y. A. et al. (2017). Foliar calcium spray confers drought stress tolerance in maize via modulation of plant growth, water relations, proline content and hydrogen peroxide activity. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 64(1), 116–131. http://doi.org/10.1080/03650340.2017.1327713
33. Hadnadev, T. D., Torbica, A., Hadnadev, M. (2011). Rheological properties of wheat flour substitutes/alternative crops assessed by Mixolab. *Procedia Food Science,* 1, 328–334. http://doi.org/10.1016/j.profoo.2011.09.051
34. Moreira, R., Chenlo, F., Torres, M. D., Prieto, D. M. (2012). Technological assessment of chestnut flour doughs regarding to doughs from other commercial flours and formulations. *Food and Bioprocess Technology*, 5, 2301–2310. http://doi.org/10.1007/s11947-011-0524-8
35. Xu, F., Liu, W., Liu, Q., Zhang, C., Hu, H., Zhang, H. (2020). Pasting, thermo, and Mixolab thermomechanical properties of potato starch–wheat gluten composite systems. *Food Science and Nutrition*, 8(5), 2279–2287. https://doi.org/10.1002/fsn3.1506
36. Awolu, O. O. (2017). Optimization of the functional characteristics, pasting and rheological properties of pearl millet-based composite flour. *Heliyon*, 3(2), Article e00240. http://doi.org/10.1016/j.heliyon.2017.e00240
37. Sapirstein, H., Wu, Y., Koksel, F., Graf, R. (2018). A study of factors influencing the water absorption capacity of Canadian hard red winter wheat. *Journal of Cereal Science*, 81, 52–59. http://doi.org/10.1016/j.jcs.2018.01.012
38. Abdelmegiud, M. H., El-Soukkary, F. A. H., El-Naggar, E. A., Abdelsalam, R. R. (2024). Chemical composition and rheological properties of some gluten-free flour formulations. *Archives of Agriculture Sciences Journal,* 7(2), 172–186. https://doi.org/10.21608/aasj.2024.294301.1170
39. Cotovanu, I., Mironeasa, S. (2021). Buckwheat seeds: Impact of milling fractions and addition level on wheat bread dough rheology. *Applied Sciences,* 11(4), Article 1731. https://doi.org/10.3390/app11041731
40. Moreira, R., Chenlo, F., Torres, M. D. (2011). Effect of sodium chloride, sucrose and chestnut starch on rheological properties of chestnut flour doughs. *Food Hydrocolloids*, 25(5), 1041–1050. http://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2010.09.025
41. Zheng, M., Sua, H., Youa, Q., Zenga, S., Zhenga, B., Zhanga, Yi. et al. (2019). An insight into the retrogradation behaviors and molecular structures of lotus seed starch-hydrocolloid blends. *Food Chemistry* 295, 548–555. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.05.166
42. Rosell, C. M., Collar, C., Haros, M. (2007). Assessment of hydrocolloid effects on the thermo-mechanical properties of wheat using the Mixolab. *Food Hydrocolloids*, 21, 452–462. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2006.05.004
43. Codina, G. G., Istrate, A.M., Ioan, C., Mironeasa, S. (2019). Rheological properties of wheat-flaxseed composite flours assessed by Mixolab and their relation to quality features. *Foods*, 8(8), Article 333. https://doi.org/10.3390/foods8080333
44. Cotovanu, I., Batariuc, A., Mironeasa, S. (2020). Characterization of quinoa seeds milling fractions and their effect on the rheological properties of wheat flour dough. *Applied Sciences,* 10(20), Article 7225. https://doi.org/10.3390/app10207225
45. Wang, S., Li, C., Copeland, L., Niu, Q, Wang, S. (2015). Starch retrogradation: A comprehensive review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 1, 568–585. https://doi.org/10.1111/1541-4337.12143
46. Serna-Saldivar, S.O. (2015). Nutrition and fortification of maize and wheat tortilla bread. In: Chapter in the book: Tortilla bread — Wheat Flour and Maize Products. AACC International Press, 2015. https://doi.org/10.1016/B978-1-891127-88-5.50002-5
47. El-Sattar Ahmed, M. A., Atia, Z.A., El-Genbeihy, M.M. (2020). Substitution of Wheat Flour by Local Cereals and Pulses Flour "An approach to overcome wheat gap in Egypt" 3- Balady Bread Quality. *Alexandria Journal of Agricultural Sciences,* 65(2), 85–110. https://doi.org/10.21608/alexja.2020.97569
48. Claudia, H.A., Domínguez-Pacheco, F.A., Cruz-Orea, A., Herrera, C.A., Gutierrez, C.D., Zepeda B. R., et al. (2012). Optical absorption coefficient of different tortilla bread by photoacoustic spectroscopy. *African Journal of Biotechnology*, 11(92), 15916–15922.
49. Zellner, D., Greene, N., Jimenez, M., Calderon, A., Diaz, Y., Sheraton, M. (2018). The effect of wrapper color on candy flavor expectations and perceptions. *Food Quality and Preference,* 68, 98–104. https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2018.02.011
50. Torun, B. (2005). Energy requirements of children and adolescents. *Public Health Nutrition*, 8(7A), 968–993. https://doi.org/10.1079/PHN2005791

51. DRI (2001). Dietary Reference Intakes for vitamin A, vitamin K, arsenic, boron, chromium, copper, iodine, iron, manganese, molybdenum, nickel, siliCon, vanadium, and zinc. Washington (DC): National Academies Press (US), 2001.
52. Abdelfattah, N. A. H., Marie, A. M., Fawki, S. (2023). The effect of ozone *on Rhyzopertha dominica*, *Tribolium Castaneum*, and technological properties of wheat flour. *Ozone: Science and Engineering,* 45(5), 488–502. https://doi.org/10.1080/01919512.2023.2171363
53. Singh, G., Muthukumarappan, K. (2008). Influence of calcium fortification on sensory, physical and rheological characteristics of fruit yogurt. *LWT — Food Science and Technology*, 41(7), 1145–1152. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2007.08.027

AUTHOR INFORMATION	СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ
Affiliation	**Принадлежность к организации**
Ashgan M. Aly, PhD, Associate Professor, Department of Bread and Pasta Research, Food Technology Research Institute, Agricultural Research Center 9 Al Gamaa street, 12619, Giza, Egypt E-mail: ashganMAM@hotmail.com ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1595-0469	**Али Ашган М.** — PhD, адъюнкт-профессор, Отдел исследований хлеба и макаронных изделий, Научно-исследовательский институт пищевых технологий, Центр сельскохозяйственных исследований 12619, Египет, Гиза, ул. Гамаа, 9 E-mail: ashganMAM@hotmail.com ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1595-0469
Amera T. Mohammed, PhD, Associate Professor, Crops Technology Research Department, Food Technology Research Institute, Agricultural Research Centre 9 Al Gamaa street, 12619, Giza, Egypt E-mail: amirataha19731973a@gmail.com E-mail: amirataha99@yahoo.com ORCID: https://orcid.org/0009-0007-0949-1765 * corresponding author	**Мохаммед Амера Т.** — PhD, адъюнкт-профессор, научно-исследовательский отдел технологии выращивания сельскохозяйственных культур, Научно-исследовательский институт пищевых технологий, Центр сельскохозяйственных исследований 12619, Египет, Гиза, ул. Гамаа, 9 E-mail: amirataha19731973a@gmail.com E-mail: amirataha99@yahoo.com ORCID: https://orcid.org/0009-0007-0949-1765 * автор для контактов
Mohamed S. Abbas, PhD, Professor, Natural Resources Department, Faculty of African Postgraduate Studies, Cairo University 1 Gamaa Street, 12613, Giza, Egypt E-mail: msaelsarawy@cu.edu.eg ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1045-384X	**Аббас Мохамед С.** — PhD, профессор, кафедра природных ресурсов, факультет последипломного образования стран Африки, Каирский университет 12613, Египет, Гиза, ул. Гамаа, 1 E-mail: msaelsarawy@cu.edu.eg ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1045-384X

Contribution	Критерии авторства
Authors equally relevant to the writing of the manuscript, and equally responsible for plagiarism.	Авторы в равных долях имеют отношение к написанию рукописи и одинаково несут ответственность за плагиат.
Conflict of interest	**Конфликт интересов**
The authors declare no conflict of interest.	Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

DOI: https://doi.org/10.21323/2618-9771-2026-9-2-162-170

Поступила 17.11.2025
Поступила после рецензирования 17.04.2026
Принята в печать 21.04.2026
© Сотченко Д. Ю., Мартиросян В. В., Костюченко М. Н., Балуян Х. А., Шариков А. Ю., Жиркова Е. В., 2026

https://www.fsjour.com/jour
Научная статья
Открытый доступ

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КРУПЫ ИЗ ЗЕРНА ГИБРИДОВ КУКУРУЗЫ ОТЕЧЕСТВЕННОЙ СЕЛЕКЦИИ ДЛЯ ЭКСТРУЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ

Сотченко Д. Ю.[1,*], Мартиросян В. В.[1], Костюченко М. Н.[1], Балуян Х. А.[1], Шариков А. Ю.[2], Жиркова Е. В.[3]

[1]Научно-исследовательский институт хлебопекарной промышленности, Москва, Россия
[2]Всероссийский научно-исследовательский институт пищевой биотехнологии — филиал ФИЦ питания, биотехнологии и безопасности пищи, Москва, Россия
[3]Российский экономический университет им. Г. В. Плеханова, Москва, Россия

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:
кукуруза, крупа, экструзия, экструдат, коэффициент расширения

АННОТАЦИЯ

В работе представлены результаты исследований крупы из зерна гибридов кукурузы отечественной селекции (Белозерный 250, Белозерный 300, К 350, Янтарный, К 500 и Машук 510): цветовые характеристики, гранулометрический состав, насыпная плотность, температура клейстеризации и вязкость крахмальной суспензии. Установлена повышенная насыпная плотность частиц из зерна гибридов кукурузы К 500, что свидетельствует о монолитном строении эндосперма. Отмечена повышенная вязкость суспензии крахмала из зерна гибридов кукурузы К 350, К 500 и Машук 510 – 7012 сР, 5930 сР и 4871 сР соответственно. Это указывает на возможное превалирование молекул амилопектина в крахмале, что может обеспечить однородность микроструктуры экструзионных продуктов. Установлены критерии оценки экструзионного процесса — удельная механическая энергия и коэффициент расширения экструдата на обработку. Выработка крупы в двухшнековом экструдере с размером частиц 250–670 мкм из зерна гибрида кукурузы К 500 происходила при меньшем крутящем моменте (52±1%) и давлении в шнековой камере экструдера 4,9±0,2 МПа. Это обеспечило меньшую удельную энергию (0,174±0,003 кВт·ч/кг) по сравнению с обработкой других образцов крупы кукурузы. Максимальный коэффициент расширения (12,0±0,2) установлен для экструдата из данной крупы. Исследование показало целесообразность использования крупы из зерна гибридов кукурузы К 350, К 500 и Машук 510, которые характеризуются монолитным строением эндосперма, лучшими термодинамическими характеристиками крахмала при тепловом воздействии. Установлены высокие показатели коэффициента расширения экструдатов всех исследуемых фракций крупы из зерна гибрида кукурузы К 500, что указывает на целесообразность применения продуктов его переработки для экструзии.

Received 17.11.2025
Accepted in revised 17.04.2026
Accepted for publication 21.04.2026
© Sotchenko D. Yu., Martirosyan V. V., Kostyuchenko M. N., Baluyan Kh. A., Sharikov A. Yu., Zhirkova E. V., 2026

Available online at https://www.fsjour.com/jour
Original scientific article
Open access

STUDY OF TECHNOLOGICAL PROPERTIES OF CEREALS FROM GRAIN OF CORN HYBRIDS OF DOMESTIC BREEDING FOR EXTRUSION PROCESSING

Denis Yu. Sotchenko[1,*], Vladimir V. Martirosyan[1], Marina N. Kostyuchenko[1], Khachatur A. Baluyan[1], Anton Yu. Sharikov[2], Elena V. Zhirkova[3]

[1]Scientific Research Institute for the Baking Industry, Moscow, Russia
[2]All-Russian Scientific Research Institute of Food Biotechnology — Subdivision of the Federal Research Centre of Nutrition, Biotechnology and Food Safety, Moscow, Russia
[3]Plekhanov Russian University of Economics, Moscow, Russia

KEYWORDS:
corn, cereals, extrusion, extrudate, expansion coefficient

ABSTRACT

This paper presents the results of a study of groats from domestically bred corn hybrids (Belozerniy 250, Belozerniy 300, K 350, Yantarniy, K 500 and Mashuk 510): color characteristics, particle size distribution, bulk density, gelatinization temperature and starch suspension viscosity. An increased bulk density of particles from the grain of corn hybrid K 500 was found, indicating a monolithic endosperm structure. Increased viscosity of starch suspensions from the grain of corn hybrids K 350, K 500 and Mashuk 510 was noted — 7012 cP, 5930 cP and 4871 cP, respectively. This indicates the possible prevalence of amylopectin molecules in the starch, which can ensure the uniformity of the microstructure of extruded products. The criteria for evaluating the extrusion process were specific mechanical energy during processing and extrudate expansion coefficient. The production of groats in a twin–screw extruder with particle sizes of 250–670 μm from the grain of corn hybrid K 500 occurred at a lower torque (52±1%) and a pressure at screw chamber of 4.9±0.2 MPa, resulting in lower specific energy (0.174±0.003 kW·h/kg) compared to the processing of other samples of corn groats. The maximum expansion coefficient (12.0±0.2) was established for the extrudate from this cereal. The study demonstrated the feasibility of using groats from the grains of corn hybrids K 350, K 500 and Mashuk 510, which are characterized by a monolithic endosperm structure and better thermodynamic properties of starch under thermal exposure. High expansion coefficients of extrudates of all studied fractions of cereals from the grain of the corn hybrid K 500 were established, which indicates the feasibility of using its processed products for extrusion processing.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: **Сотченко, Д. Ю., Мартиросян, В. В., Костюченко, М. Н., Балуян, Х. А., Шариков, А. Ю., Жиркова, Е. В.** (2026). Исследование технологических свойств крупы из зерна гибридов кукурузы отечественной селекции для экструзионной обработки. *Пищевые системы*, 9(2), 162–170. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2026-9-2-162-170

FOR CITATION: **Sotchenko, D. Yu., Martirosyan, V. V., Kostyuchenko, M. N., Baluyan, Kh. A., Sharikov, A. Yu., Zhirkova, E. V.** (2026). Study of technological properties of cereals from grain of corn hybrids of domestic breeding for extrusion processing. *Food Systems*, 9(2), 162–170. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2026-9-2-162-170

1. Введение

Одной из наиболее продуктивных и перспективных зерновых культур в мире является кукуруза. Кукуруза (*Zea mays*) — широко возделываемая культура, она используется многими народами как один из основных ингредиентов в системе питания [1]. По данным Продовольственной и сельскохозяйственной организации ООН (ФАО), в 2024 г. мировое производство зерна кукурузы составило 1218,2 млн т, которая возделывалась на площади 209,9 млн гектаров. В 2024 году кукуруза являлась второй по распространенности сельскохозяйственной культурой в мире, занимая 14,1% от общей посевной площади [2].

В Российской Федерации в 2024 году на площади 2390,8 тыс. гектаров было выращено зерна кукурузы в количестве 13,9 млн т, что составило 3,8% от общей площади возделывания сельскохозяйственных культур [3].

Увеличение производства зерновых культур, в том числе кукурузы, способствует расширению сырьевой базы для производства пищевых продуктов и кормов, что является одним из главных приоритетов в обеспечении продовольственной безопасности Российской Федерации. В последние годы наблюдается тенденция увеличения валового сбора зерна кукурузы, что свидетельствует о повышенном внимании со стороны сельхозпроизводителей к данной культуре.

В Российской Федерации существует несколько ведущих селекционно–семеноводческих организаций, занимающихся селекцией гибридов кукурузы, в том числе ФГБНУ ВНИИ кукурузы и ООО СП ССК «Кукуруза». Ими создано более 80 конкурентоспособных гибридов кукурузы различных групп спелости и направлений использования, которые широко возделываются на территории страны и ежегодно реализуются в объеме до 16 тыс. т семян. Помимо создания гибридов зернового и силосного направления ведется работа по селекции гибридов кукурузы для пищевых целей, а именно гибридов сахарной, лопающейся и белозерной кукурузы [4].

Продукты переработки зерна кукурузы (крупа, мука, крахмал, масло) являются одними из широко используемых ингредиентов, применяемых в производстве хлебобулочных, макаронных и кондитерских изделий. Наличие в продуктах переработки важных эссенциальных пищевых веществ — аминокислот, ненасыщенных жирных кислот, пищевых волокон, витаминов и минеральных элементов — обусловливает их применение в рецептурах обогащенной продукции [5].

Кукурузная мука отличается от пшеничной муки по внешнему виду и химическому составу. Мука из кукурузы, риса и амаранта относится к безглютеновым альтернативам пшеничной муке, что позволяет использовать ее в питании людей с целиакией [5–7]. Кукурузная мука в сравнении с пшеничной мукой легче усваивается в организме человека, стимулирует желчевыделение и перистальтику кишечника, нормализует внутренний микробиом, обладает дегидратическим (мочегонным) свойством, укрепляет сердечно–сосудистую систему, способствует нормализации уровня холестерина в крови и улучшению состояния кровеносных сосудов [8]. Исследования, проведенные южноафриканскими учеными, показали, что потребление желтых овощей и продуктов из желтозерной кукурузы способствует снижению уровня систолического артериального давления и инсулина. Оно также связано с уменьшением содержания холестерина, липопротеинов низкой плотности и триглицеридов, что свидетельствует о пользе этих продуктов для здоровья населения [9].

За период 2020–2024 гг. в России наблюдался устойчивый рост производства зерновых продуктов для завтрака и других изделий из зерновых культур, что отражает растущий спрос потребителей на здоровое питание. Согласно статистическим данным, в 2024 году отечественные производители выпустили свыше 498 тыс. тонн указанной продукции, что на 8,6% превысило объемы производства 2023 года. Этот рост свидетельствует о восстановлении и укреплении отрасли, которая активно реагирует на изменения потребительских предпочтений и запросов рынка [10].

Применение зерна кукурузы в пищевой промышленности способствует созданию широкого спектра пищевых продуктов, отвечающих современным потребительским предпочтениям и принципам здорового питания. Экструзионные технологии позволяют перерабатывать цельное зерно, крупу или муку из кукурузы в разнообразную продукцию — цельнозерновые хлебцы, хрустящие подушечки и батончики, панировочные смеси, а также текстураты и концентраты [11].

Цвет экструдированного пищевого продукта представляет критически значимый показатель, определяющий потребительское восприятие качества. Формирование цветовых характеристик обусловлено комплексом факторов, включающих химический состав исходного сырья, технологические параметры экструзионной обработки и температурный режим процесса. При воздействии повышенных температур и пониженной относительной влажности в условиях экструзии инициируются каскадные химические трансформации органических соединений. В частности, протекают реакции карамелизации углеводов, неферментативные реакции между белками и полисахаридами, а также окислительная деградация природных пигментов [12,13].

Высокотемпературная экструзия представляет технологический процесс переработки растительного сырья, осуществляемый при влажности массы 14–20% и давлении 12–20 МПа, который приводит к расширению получаемого продукта за счет резкого снижения давления и температуры с мгновенным превращением воды в водяной пар. Указанная технология характеризуется высокой экономичностью и универсальностью, позволяет обрабатывать как традиционное крахмалосодержащее сырье (картофель, кукурузу), так и высокобелковое сырье (мясо, рыбу) для получения разнообразных пищевых продуктов с высокопористой структурой [14]. Для осуществления вышеуказанного процесса используют одношнековые или двушнековые экструдеры [12]. Ключевую роль в процессе экструзии играют явления тепло– и массопереноса, при этом влажность материала существенно влияет на эффективный коэффициент теплопроводности и требует оптимизации режима обработки с учетом всех технологических факторов [13].

Цель работы — исследование технологических свойств крупы из зерна гибридов кукурузы отечественной селекции, влияющих на формирование качества экструзионных изделий.

2. Объекты и методы

Для исследований отобрано зерно гибридов кукурузы отечественной селекции урожая 2022 года (Белозерный 250, Белозерный 300, К 350, Янтарный, К 500 и Машук 510), включенных в Госреестр для возделывания на территории РФ. Гибриды получены путем скрещивания родительских линейных и гибридных компонентов на селекционных участках ФГБНУ ВНИИ кукурузы и ООО СП ССК «Кукуруза».

Исследовали цветовые характеристики зерна гибридов кукурузы, для объективной оценки использовали колориметр CR-410 (Konica Minolta, Япония) в системе CIELAB, наиболее приближенной к человеческому зрению, с анализом значений по координатам. L^* (Lightness) описывает светлоту по шкале от 0 до 100%, где 0 — абсолютно черный цвет; 100 — абсолютно белый цвет; a^* может варьироваться от отрицательного значения (–128°), соответствующего зеленому цвету, до положительного (+128°), соответствующего красному цвету; b^*: отрицательное значение (–128°) соответствует синему цвету, а положительное (+128°) — желтому цвету [15]. Различия между двумя цветами (оригинальный белый цвет калибровочной пластины; опытный образец) обозначаются метрикой ΔE^*, при этом если $\Delta E^* < 1$ — различия почти незаметны; если $\Delta E^* = 2–4$ — различия заметны при близком рассмотрении; если $\Delta E^* > 5$ — различия существенно заметны.

Расчёт (ΔE^*) производили по формуле:

$$\Delta E = \sqrt{\left(L^* - L'\right)^2 + \left(a^* - a'\right)^2 + \left(b^* - b'\right)^2}, \quad (1)$$

где: ΔE — цветовые различия от оригинального белого цвета, °C;

L^*, %; a^*, °C; b^*, °C — цветовые координаты оригинального белого цвета;

L', %; a', °C; b', °C — цветовые координаты, полученные при измерении исследуемой пробы.

Для фракционирования крупы с размером частиц от 250 мкм до 1000 мкм зерно кукурузы измельчали в молотковой дробилке для зерна ДМ-5 (ООО ПК «Проммаш», Россия). Далее для разделения полученного измельченного продукта на целевые фракции проводили ситовой анализ в соответствии с ГОСТ 26312.4-84[1]. Разделение на фракции крупы осуществляли на рассеве лабораторном У1-ЕРЛ-10-2 (ООО «Зернотехника», Россия) с использованием комплекта контрольных сетчатых сит диаметром 200 мм. Сита были установлены в последовательности с уменьшением размера ячеек: сверху — сито № 1,0 (1000 мкм), затем № 0,8 (800 мкм), № 0,67 (670 мкм), № 0,25 (250 мкм) и поддон для сбора частиц менее 250 мкм. Навеску измельченного материала помещали на верхнее сито и просеивали механическим способом в течение 5 минут до полного разделения частиц. В результате были сформированы четыре фракции крупки: крупная (>800 мкм, сход с сита 800 мкм), средняя (670–800 мкм), мелкая (250–670 мкм) и фракция мучки (< 250 мкм).

Насыпную плотность круп разного гранулометрического состава определяли на металлическом волюметре Скотта PT–SV100 (Pharma Test, Германия). В приемную воронку прибора засыпали крупу,

[1] ГОСТ 26312.4-84 «Крупа. Методы определения крупности или номера, примесей и доброкачественного ядра». М.: Стандартинформ, 2010. — 6 с

которая перемещалась через несколько перегородок, и после наполнения мерного металлического цилиндра его взвешивали. Насыпную плотность рассчитывали по формуле [16]:

$$\rho = \frac{m}{v}, \quad (2)$$

где: ρ — насыпная плотность до уплотнения, г/см^3; m — масса крупы, г; v — объем крупы в цилиндре до уплотнения, см^3.

Влажность кукурузной крупы определяли согласно ГОСТ 26312.7-88[2] с использованием шкафа сушильного электрического СЭШ-3М.

Для определения вязкости и температуры клейстеризации крахмальной суспензии в условиях контролируемой температуры и сдвига использовали ротационный вискозиметр RVA Techmaster (Newport Scientific, Австралия). Навеску образца массой 3,5 г помещали в мерный стаканчик и приливали 25 мл дистиллированной воды. Выбор параметров анализа осуществляли эмпирическим путем с учетом литературных данных [17]. Профиль анализа включал следующие этапы: исходное состояние суспензии при температуре 50 °C; перемешивание суспензии специальной лопаткой устройства в течение 1 мин при 50 °C; далее при непрерывном перемешивании — линейное повышение температуры до 95 °C за 3 мин 30 с; выдерживание крахмальной суспензии при 95 °C с перемешиванием в течение 2 мин 30 с; последующее охлаждение до 50 °C за 4 мин; завершающий этап — исследование вязкости суспензии при температуре 50 °C в течение 4 мин.

Примененный температурно–временной профиль соответствует общепринятым подходам к оценке реологических свойств крахмалсодержащего сырья [17]. Детальный анализ кривых вязкости позволяет оценить следующие параметры: пиковую, конечную вязкость, степень разжижения и ретроградации, что важно для прогнозирования поведения материала при экструзионной обработке и оценке качества готовых экструдатов [18].

Выработку экструзионных изделий (экструдатов) осуществляли во Всероссийском научно–исследовательском институте пищевой биотехнологии — филиале ФГБУН «ФИЦ питания и биотехнологии» методом горячей экструзии в универсальном двухшнековом экструдере Continua 37 (Werner & Phleiderer, Германия) с дозатором. Процесс проводили при следующих параметрах: диаметр шнека — 37 мм, соотношение диаметра к длине шнека — 1:27, фильера с двумя отверстиями прямоугольного сечения 12 × 1,5 мм, производительность — 17 кг/ч, скоростью вращения шнеков — 240 мин$^{-1}$, влажность смеси — 14,5 %, температура — 170–185 °C. Коэффициент расширения (*EI*) экструдатов рассчитывали по соотношению площадей сечения экструдата и отверстия фильеры по формуле [19,20]:

$$EI = \frac{S_c \text{ экструдата}}{S_c \text{ фильеры}}, \quad (3)$$

где: *EI* — коэффициент расширения; S_c экструдата — площадь сечения экструдата, мм^2; S_c фильеры — площадь сечения отверстия фильеры, мм^2.

Расчет затрат удельной механической энергии (SME) при экструзионной обработке осуществляли с учетом технических характеристик экструдера по формуле [21]:

$$SME = \frac{nPM}{100 n_m Q}, \quad (4)$$

где: *SME* — удельная механическая энергия, кВт·ч/кг; n — частота вращения шнека, мин$^{-1}$; n_m — максимальное число оборотов шнека, мин$^{-1}$; M — крутящий момент, %; P — электрическая мощность двигателя, кВт; Q — производительность, кг/ч.

Статистическую обработку результатов проводили с использованием однофакторного дисперсионного анализа (ANOVA) отдельно для каждого гибрида кукурузы и каждого исследуемого показателя, сравнивая четыре фракции крупы по размеру частиц. При выявлении общего статистически значимого эффекта выполняли апостериорное множественное сравнение средних по критерию Тьюки (Tukey HSD). Результаты представлены в виде среднего значения ± стандартного отклонения ($M \pm SD$), $n = 3$. Различия считали статистически значимыми при $p < 0,05$.

3. Результаты и обсуждение

В работе использовали образцы зерна гибридов белозерной (Белозерный 250, Белозерный 300) и желтозерной кукурузы (К 350, Янтарный, К 500 и Машук 510) отечественной селекции. Початки гибридов кукурузы представлены на Рисунке 1.

[2] ГОСТ 26312.7-88 «Крупа. Метод определения влажности». М.: Стандартинформ, 2010. — 6 с

В рамках исследования были проанализированы шесть гибридов кукурузы, различающихся по вегетационному периоду, категории гибридов и типу зерна. Трехлинейный, среднеранний гибрид кукурузы Белозерный 250 характеризуется высоким растением и зубовидным белым зерном пищевого назначения. Простой, среднеспелый гибрид кукурузы Белозерный 300 имеет растение средней высоты и белое зубовидное зерно пищевого назначения. Простой, среднеспелый гибрид кукурузы К 350 отличается высоким растением и зубовидным желтым зерном. Простой, среднепоздний гибрид кукурузы Янтарный относится к лопающейся кукурузе, растение средней высоты, зерно кремнистое, оранжевого цвета, пищевого назначения. Простой, позднеспелый гибрид кукурузы К 500 формирует высокое растение с зубовидным желтовато-белым зерном. Простой, позднеспелый гибрид кукурузы Машук 510 обладает высоким растением и желто — оранжевым зерном промежуточного типа ближе к кремнистому. Таким образом, изученные гибриды охватывают широкий спектр спелости (от среднераннего до позднеспелого), типов зерна и морфологических признаков, что позволяет дифференцированно подходить к их использованию в зависимости от почвенно–климатических условий и целевого назначения.

Объективные цветовые характеристики крупы из зерна гибридов кукурузы определяли с использованием универсального колориметра CR-410 (Konica Minolta, Япония). Данные представлены на Рисунке 2.

Наибольшее значение показателя светлоты (L^*) отмечено в гибридах белозерной кукурузы Белозерный 250 и Белозерный 300 — 71,01 ± 0,13 % и 71,31 ± 0,36 % соответственно. Используя показатель цветовых различий от оригинального белого цвета (ΔE^*), можно констатировать, что зерно гибридов белозерной кукурузы Белозерный 250 и Белозерный 300 находится ближе в системе цветовых координат к оригинальному белому цвету 12,94 ± 0,10 °C и 12,69 ± 0,38 °C соответственно. Зерно указанных гибридов кукурузы не содержит оранжево–желтых пигментов — каротиноидов, что и обеспечивает белый цвет зерна.

Зерно гибрида кукурузы Янтарный по цветовым координатам имело минимальные значения показателя b^* среди всех исследуемых гибридов (20,26 ± 0,19 °C) и показателя ΔE^* среди четырех желтозерных гибридов (19,36 ± 0,13 °C).

Показатель цветовых различий (ΔE^*), рассчитанный относительно оригинального белого цвета, позволил объективно оценить визуальное различие между группами гибридов. Наименьшие значения ΔE^* у белозерных гибридов Белозерный 250 и Белозерный 300 и у гибрида Янтарный с минимальной желтизной (b^*) подтверждают, что данный показатель, как и сама координата b^*, может служить интегральной характеристикой, связанной с накоплением каротиноидов. Это согласуется с выводами бразильских ученых о высокой корреляции между параметрами, используемыми в системе CIELAB, и содержанием пигментов в пищевых продуктах [22].

Наименьшие одинаковые значения показателя цвета L^* были получены для зерна гибридов кукурузы К 500 и Машук 510 (65,87 ± 0,78 %). Среди гибридов кукурузы К 350, К 500 и Машук 510 следует отметить гибрид К 500 по наименьшему значению показателя b^* — 23,58 ± 0,48 °C.

Полученные значения светлоты (L^*) и желтизны (b^*) для изученных гибридов можно сопоставить с результатами российских коллег, полученными при исследовании местных образцов кукурузы из Азербайджана. В указанной работе диапазон варьирования по показателям (L^*) составил 42,36–66,49 % и (b^*) — 18,07–44,40 °C. Полученные экспериментальные данные светлоты L^* для исследуемых желтозерных гибридов, показавшие наименьшее значение 65,87 ± 0,78 % для гибридов К 500 и Машук 510, находятся в верхней части указываемого диапазона варьирования, что может указывать на более светлую окраску исследуемых гибридов кукурузы. Экспериментальные данные желтизны b^* (от 20,26 ± 0,19 °C у гибрида Янтарный до 25,35 ± 0,36 °C у гибрида К 350) полностью попадают в интервал, характерный для изученной азербайджанской коллекции [23].

Проведенные исследования позволили установить различия в составных компонентах цвета зерна исследуемых гибридов кукурузы, что может оказывать существенное влияние на цвет продуктов, полученных из конкретной партии зерна.

Для экструзионной обработки зерновых продуктов, в частности крупы, важным технологическим фактором является плотность упаковки крахмальных гранул в белковой матрице [24]. Данный показатель можно косвенно охарактеризовать, определяя насыпную плотность круп из зерна исследуемых гибридов кукурузы различного гранулометрического состава — < 250 мкм, 250–670 мкм, 670–800 мкм и 800–1000 мкм. Данные представлены на Рисунке 3.



Рисунок 1. **Початки гибридов кукурузы, используемой в исследованиях**
Figure 1. **Ears of corn hybrids used in the study**

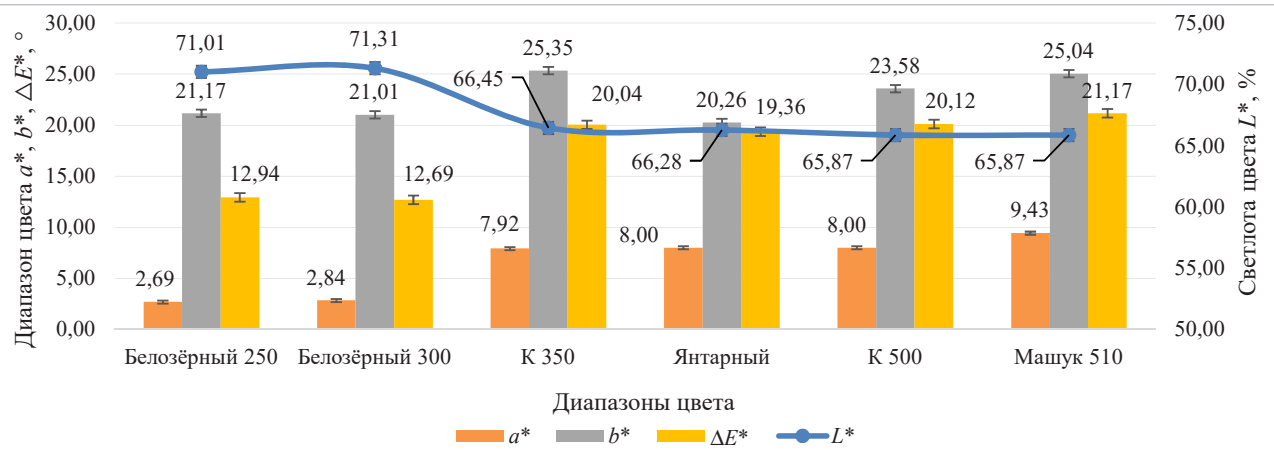


Рисунок 2. **Цветовые характеристики зерна гибридов кукурузы отечественной селекции**
Figure 2. **Color characteristics of kernels of corn hybrids of domestic breeding**

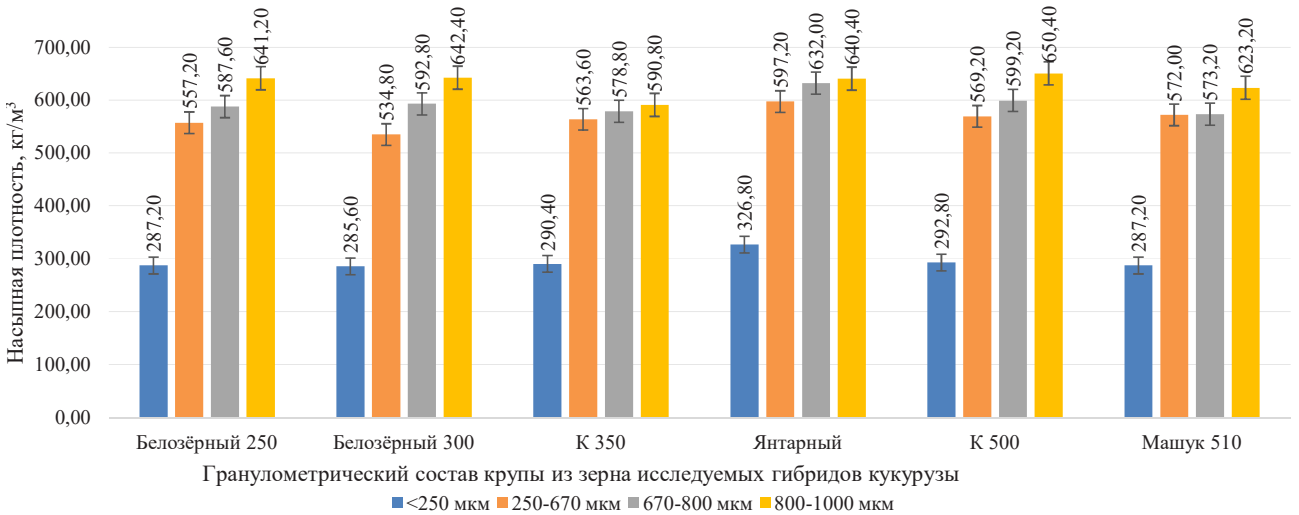
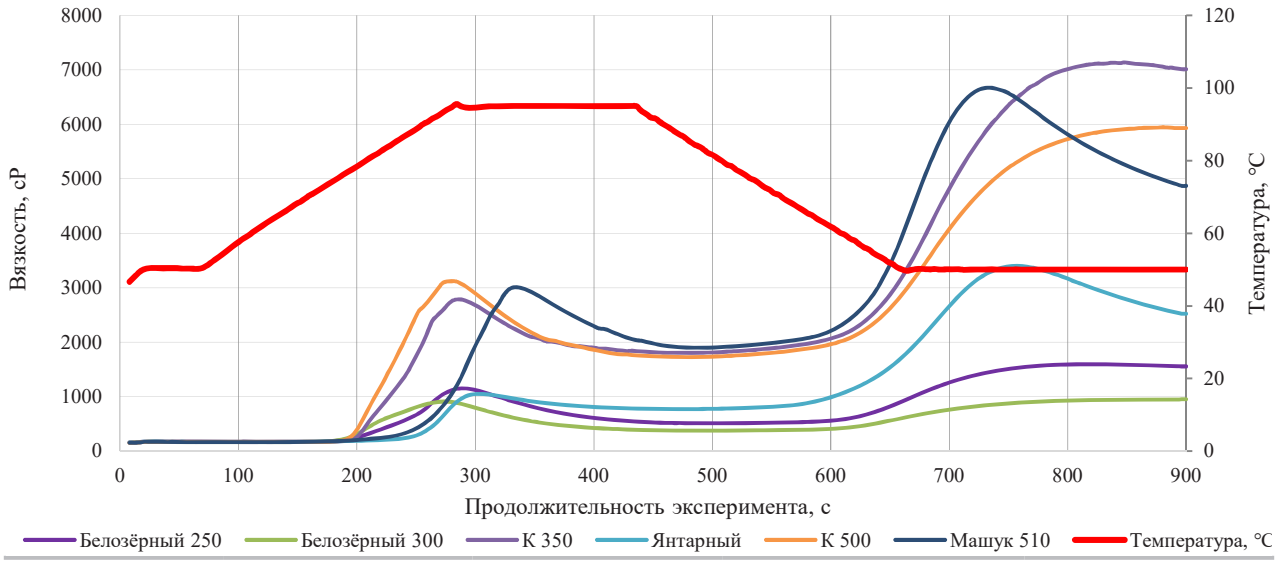


Рисунок 3. **Насыпная плотность крупы из зерна исследуемых гибридов кукурузы разного гранулометрического состава**
Figure 3. **Bulk density of groats from kernels of the corn hybrids under study with different particle size distribution**

Наиболее низкая насыпная плотность установлена в пробах крупы с размером частиц < 250 мкм у всех исследуемых гибридов кукурузы. Крупа из зерна гибрида лопающейся кукурузы Янтарный отличается большей насыпной плотностью по сравнению с другими гибридами кукурузы. Возможно, это связано с тем, что зерно лопающейся кукурузы имеет больший удельный вес стекловидного эндосперма. Зерновка отличается повышенным содержанием белка, что позволяет использовать этот подвид кукурузы в производстве попкорна. Белок формирует защитную матрицу, которая окружает крахмальные гранулы. Эта матрица физически препятствует полному и быстрому проникновению воды в гранулы в условиях экструзии, замедляя или предотвращая полную клейстеризацию крахмала. Ограничивая набухание крахмала, белок снижает степень структурной конверсии крахмала, необходимой для формирования легкого, равномерно вспученного расплава [25]. Кукурузная крупа из гибридов Белозерный 250 и Белозерный 300 с гранулометрическим составом 1000 мкм имела незначительные различия насыпной плотности — 641,2 и 642,4 кг/м^3 соответственно.

При сравнении крупы различного гранулометрического состава из гибридов кукурузы К 350 и К 500 можно выделить крупу всех размеров частиц из гибрида кукурузы К 500, т.к. все фракции имели большую насыпную плотность. Это позволило сделать вывод, что крупа с максимальной насыпной плотностью, обусловленной монолитным строением эндосперма, может быть более предпочтительна для экструзионной обработки и получения пористых пищевых продуктов.



Гибрид кукурузы	Температура клейстеризации, °С	Пиковая вязкость, сР	Минимальное значение после пиковой вязкости, сР	Конечная вязкость, сР
Белозерный 250	76,85	1152	509	1555
Белозерный 300	75,25	908	373	950
К 350	76,95	2784	1802	7012
Янтарный	87,50	1049	770	2523
К 500	76,05	3119	1723	5930
Машук 510	85,05	3007	1896	4871

Рисунок 4. **Вязкость крахмальной суспензии из крупы гибридов кукурузы**
Figure 4. **Viscosity of starch suspensions from the groats of corn hybrids**

При экструзионной обработке крахмалосодержащего сырья происходит процесс клейстеризации, молекулярной деструкции, комплексообразования, интенсивность протекания которых обусловлена свойствами крахмала зерна.

Нагрев и охлаждение крахмальной суспензии вызывают изменения ее вязкости, характеризуемой кривой, полученной на ротационном вискозиметре RVA (Rapid Visco Analyser) Techmaster (Newport Scientific, Австралия). Профиль RVA можно программировать, обеспечивая гибкую настройку для исследования конкретного продукта. Показатель вязкости отражает важные изменения структуры крахмала и обусловливает технологические и органолептические свойства готовой продукции [26].

Профили изменения вязкости крахмальных суспензий из зерна гибридов кукурузы представлены на Рисунке 4.

Полученные кривые, представленные на Рисунке 4, можно разделить на три области: низких температур от 50 °С до 90 °С (левая часть), высоких температур — 90 °С (средняя часть) и снижения температуры от 90 °С до 50 °С (правая часть). Область низких температур соответствует вязкости суспензии в холодном состоянии. По мере нагревания вязкость начинает возрастать, что обусловлено началом процесса клейстеризации крахмала. Как показано в работе австралийских ученых, этот этап связан с набуханием гранул и нарушением их кристаллической структуры, причем скорость и степень набухания определяются размером молекул и плотностью разветвления амилопектина. Авторы отмечают, что степень ретроградации зависит от содержания амилозы и длины ветвей, которые определяют способность молекул к ассоциации [27]. В средней области (температура около 90 °С) достигается максимальная вязкость, что соответствует завершению клейстеризации и максимальному набуханию крахмальных гранул. Дальнейшее повышение температуры и сдвиговое воздействие приводят к деструкции гранул и снижению вязкости. Согласно результатам мексиканских коллег, добавление лимонной кислоты и оптимизация параметров экструзии могут изменять характер кривой, смещая пик вязкости и влияя на стабильность клейстера [28]. Правая область (снижение температуры от 90 °С до 50 °С) отражает процесс ретроградации: при охлаждении происходит частичное восстановление молекулярных взаимодействий, что выражается в повторном повышении вязкости. Таким образом, характер кривых на Рисунке 4 наглядно демонстрирует, что изменение вязкости крахмальной суспензии при нагревании и охлаждении определяется температурой клейстеризации, структурными особенностями крахмала и условиями термомеханического воздействия [27,28]. Крахмальные суспензии, полученные из зерна гибридов кукурузы Янтарный и Машук 510, достигали пиковой вязкости в области высоких температур — 87,50 °С и 85,05 °С соответственно. Крахмал исследуемых проб из зерна гибридов кукурузы Белозерный 250, Белозерный 300, К 350 и К 500 начинал клейстеризироваться при более низкой температуре — 76,85 °С, 75,25 °С, 76,95 °С и 76,05 °С соответственно. Вероятно, это обусловлено различиями в молекулярном строении полисахаридов и соотношением линейных и разветвленных структур.

Предположения о взаимодействии амилозы и амилопектина в клейстеризованном состоянии при низком содержании воды подтверждаются работами Antonov с коллегами [29], Brochard [30] и Grosberg and Khokhlov [31]. Согласно модели Antonov и соавторов несовместимость нейтральных полисахаридов в системе, состоящей из двух полисахаридов и воды, обусловлена различиями в структуре их макромолекулярных цепей [29].

В процессе экструзии крахмал трансформируется в плотный гель. Известно, что амилоза, один из компонентов крахмала, может образовывать спиральные структуры V-типа с небольшими включениями молекул, таких как липиды. Эти амилозо-липидные комплексы важны, так как они влияют на свойства и качество крахмалосодержащих продуктов [32,33].

Температура и влажность являются ключевыми факторами, определяющими степень и полноту клейстеризации крахмала при экструдировании. В работе бразильских ученых методом дифференциальной сканирующей калориметрии (DSC) установлено, что с увеличением влажности температура перехода (максимум эндотермы) закономерно снижается. Так, при влажности 10 % температура максимальной эндотермы составила 126 °С, при 20 % — 123 °С, а при 30 % — 109 °С. При повышении влажности до 40–60 % температура перехода стабилизируется на уровне 107–108 °С. Авторы отмечают, что при низкой влажности (менее 10 %) процесс разрушения гранул протекает при значительно более высоких температурах (168 °С при 0 % влажности). Таким образом, для полной клейстеризации крахмала в экструдере могут применяться различные сочетания параметров: например, температура около 120 °С при влажности 20–30 % или более высокая температура при снижении влажности до 10–20 %. Выбор режима зависит от требуемой степени деструкции материала и энергетических затрат процесса [34]. Высокая температура ускоряет разрушение структуры крахмальных гранул и переход полисахаридов в растворимую форму, а наличие достаточного количества влаги обеспечивает набухание и термомеханическую деструкцию

крахмала. При недостаточной влажности клейстеризация протекает неполно, так как вода необходима для проникновения в гранулы и разрыва внутренних связей [35]. Слишком низкая или слишком высокая влажность может снижать эффективность процесса: при избытке воды снижаются температура и давление, а при недостатке ограничивается набухание и растворение крахмала [36,37]. Таким образом, оптимальное сочетание температуры и влажности обеспечивает максимальную степень клейстеризации крахмала при экструдировании. На основании полученных данных можно предположить, что образцы суспензий из крупы, содержащие большее количество амилопектина, могут иметь более высокую вязкость раствора вследствие увеличения объема разветвленных молекул при гидратации [38].

Проведены исследования по изменению вязкости крахмальной суспензии крупы, полученной из зерна гибридов кукурузы К 350, К 500 и Машук 510. В результате анализа было установлено, что указанные гибриды достигли пиковой вязкости — 2784 сР, 3119 сР и 3007 сР соответственно (Рисунок 4). В крахмальной суспензии из зерна гибридов кукурузы К 350, К 500 и Машук 510 процесс дезагрегации макромолекул до пиковой вязкости протекал быстрее, чем в крахмальной суспензии крупы из зерна гибридов кукурузы Белозерный 250, Белозерный 300 и Янтарный, вследствие возможной повышенной плотности или неоднородности частиц.

Минимальное значение вязкости суспензии после пика в средней области характеризуется величиной спада и считается истинной вязкостью в горячем состоянии. Минимальное значение вязкости крахмального клейстера, приготовленного из крупы зерна гибридов кукурузы К 350, К 500 и Машук 510, составило 1802 сР, 1723 сР и 1896 сР соответственно (Рисунок 4), отражая начальную стадию формирования клейстера.

Область снижения температур определяют как область выравнивания или увеличения вязкости [17]. По мере формирования структуры в подвергаемом тепловой обработке образце суспензии этот показатель отражает степень клейстеризации крахмала в пробе зерна гибридов кукурузы. Крахмальная суспензия с доминирующим дезагрегационным состоянием макромолекул характеризуется более высоким значением вязкости. Установлены конечные показатели вязкости проб крупы из зерна гибридов кукурузы К 350, К 500 и Машук 510 — 7012 сР, 5930 сР и 4871 сР соответственно (Рисунок 4).

Для формирования изотропной структуры пористых продуктов важным фактором является увеличение вязкости крахмальной суспензии в правой области RVA-профиля. Таким свойством обладает крахмал из зерна гибрида кукурузы К 500, в отличие от образцов крахмала из зерна гибридов кукурузы К 350 и Машук 510, в которых вязкость суспензии снижалась к окончанию эксперимента. На основании результатов исследований [36,37,39], представленных в работах, сделаны выводы, демонстрирующие несовместимость амилозы и амилопектина — полисахаридов с линейной и разветвленной структурой — в системах с высоким содержанием влаги. В этих условиях возможна полная реализация присущих макромолекулам конформаций, что делает полученные выводы логичными. Однако следует учитывать, что уменьшение содержания влаги в системах приводит к снижению вероятности реализации полного набора конформаций макромолекул биополимеров [40,41].

Можно предположить, что образцы проб из зерна кукурузы К 350, К 500 и Машук 510 содержат большее количество амилопектина и его разветвленные молекулы при гидратации увеличиваются в объеме [42,43], что приводит к увеличению вязкости раствора (Рисунок 4).

Применяли экструзионную обработку кукурузной крупы для оценки коэффициента расширения экструдата.

Образцы кукурузной крупы экструдировали на двухшнековом экструдере Continua 37 (Werner & Phleiderer, Германия). Перед началом работы каждую смесь калибровали на дозаторе экструдера для обеспечения эквивалентной производительности для каждого образца.

В Таблице 1 показаны параметры экструзионной обработки круп разного гранулометрического состава 6 гибридов кукурузы отечественной селекции. Об эффективности экструзионной обработки судили по показателю коэффициента расширения.

Температура в экструдере формируется двумя способами. Во-первых, это внешний нагрев — в работе британских ученых использовался электрический нагрев корпуса экструдера в двух зонах. Во-вторых, это внутренний нагрев за счет вязкостной диссипации: при вращении шнеков материал сдвигается, возникает трение и выделяется тепло. В результате фактическая температура материала может отличаться от заданной. В исследовании при одинаковых настройках нагрева температура материала и давление менялись в зависимости от состава смеси, что объясняется разной интенсивностью диссипации.

Таблица 1. **Режимы экструзионной обработки крупы из зерна гибридов кукурузы**

Table 1. **Regimes of extrusion processing of groats from kernels of corn hybrids**

Гибрид кукурузы	Размер частиц, мкм	Влажность крупы, %	Температура, °С	Крутящий момент, %	Давление, МПа	Коэффициент расширения	Удельная механическая энергия, кВт·ч/кг
Белозерный 250	< 250	$11{,}8 \pm 0{,}2^{c}$	185 ± 2^{c}	56 ± 2^{c}	$4{,}5 \pm 0{,}2^{a}$	$7{,}9 \pm 0{,}1^{b}$	$0{,}250 \pm 0{,}009^{d}$
	250–670	$11{,}1 \pm 0{,}1^{b}$	172 ± 1^{b}	56 ± 1^{c}	$6{,}0 \pm 0{,}3^{c}$	$5{,}8 \pm 0{,}2^{a}$	$0{,}188 \pm 0{,}003^{c}$
	670–800	$10{,}4 \pm 0{,}4^{a}$	165 ± 1^{a}	40 ± 1^{a}	$6{,}0 \pm 0{,}2^{c}$	$7{,}6 \pm 0{,}2^{b}$	$0{,}134 \pm 0{,}003^{a}$
	800–1000	$10{,}3 \pm 0{,}1^{a}$	167 ± 1^{a}	47 ± 1^{b}	$5{,}4 \pm 0{,}1^{b}$	$10{,}7 \pm 0{,}1^{c}$	$0{,}158 \pm 0{,}003^{b}$
Белозерный 300	< 250	$11{,}1 \pm 0{,}1^{c}$	182 ± 2^{b}	90 ± 2^{c}	$6{,}0 \pm 0{,}2^{b}$	$7{,}2 \pm 0{,}1^{a}$	$0{,}302 \pm 0{,}007^{c}$
	250–670	$10{,}8 \pm 0{,}1^{b,c}$	174 ± 2^{a}	51 ± 1^{a}	$6{,}1 \pm 0{,}1^{b}$	$8{,}0 \pm 0{,}1^{b}$	$0{,}171 \pm 0{,}003^{a}$
	670–800	$10{,}4 \pm 0{,}1^{b}$	172 ± 1^{a}	57 ± 2^{b}	$5{,}1 \pm 0{,}1^{a}$	$7{,}4 \pm 0{,}1^{a}$	$0{,}191 \pm 0{,}007^{b}$
	800–1000	$9{,}5 \pm 0{,}3^{a}$	170 ± 1^{a}	52 ± 2^{a}	$4{,}8 \pm 0{,}2^{a}$	$9{,}9 \pm 0{,}1^{c}$	$0{,}174 \pm 0{,}007^{a}$
К 350	< 250	$11{,}1 \pm 0{,}2^{c}$	170 ± 2^{b}	80 ± 3^{d}	$7{,}5 \pm 0{,}3^{c}$	$9{,}0 \pm 0{,}1^{a}$	$0{,}268 \pm 0{,}01^{d}$
	250–670	$10{,}5 \pm 0{,}2^{b}$	168 ± 1^{b}	60 ± 2^{c}	$5{,}3 \pm 0{,}2^{b}$	$9{,}6 \pm 0{,}1^{b}$	$0{,}201 \pm 0{,}007^{c}$
	670–800	$9{,}8 \pm 0{,}1^{a}$	162 ± 1^{a}	46 ± 1^{a}	$5{,}2 \pm 0{,}2^{b}$	$8{,}8 \pm 0{,}2^{a}$	$0{,}154 \pm 0{,}003^{a}$
	800–1000	$10{,}0 \pm 0{,}1^{a}$	175 ± 2^{c}	54 ± 1^{b}	$4{,}3 \pm 0{,}1^{a}$	$11{,}9 \pm 0{,}1^{c}$	$0{,}181 \pm 0{,}003^{b}$
Янтарный	< 250	$10{,}9 \pm 0{,}1^{c}$	160 ± 2^{a}	46 ± 1^{a}	$6{,}0 \pm 0{,}2^{b}$	$1{,}8 \pm 0{,}1^{a}$	$0{,}154 \pm 0{,}003^{a}$
	250–670	$10{,}7 \pm 0{,}2^{c}$	174 ± 2^{b}	56 ± 2^{b}	$5{,}0 \pm 0{,}2^{a}$	$8{,}2 \pm 0{,}1^{c}$	$0{,}188 \pm 0{,}007^{b}$
	670–800	$10{,}1 \pm 0{,}1^{b}$	172 ± 1^{b}	46 ± 1^{a}	$5{,}0 \pm 0{,}1^{a}$	$5{,}6 \pm 0{,}1^{b}$	$0{,}154 \pm 0{,}003^{a}$
	800–1000	$9{,}4 \pm 0{,}1^{a}$	170 ± 1^{b}	46 ± 1^{a}	$4{,}7 \pm 0{,}2^{a}$	$9{,}2 \pm 0{,}1^{d}$	$0{,}154 \pm 0{,}003^{a}$
К 500	< 250	$10{,}5 \pm 0{,}1^{b}$	180 ± 2^{b}	80 ± 2^{c}	$6{,}7 \pm 0{,}3^{c}$	$11{,}6 \pm 0{,}2^{b}$	$0{,}268 \pm 0{,}007^{c}$
	250–670	$10{,}3 \pm 0{,}2^{b}$	172 ± 1^{a}	52 ± 1^{a}	$4{,}9 \pm 0{,}2^{b}$	$12{,}0 \pm 0{,}2^{b}$	$0{,}174 \pm 0{,}003^{a}$
	670–800	$9{,}5 \pm 0{,}2^{a}$	175 ± 2^{a}	57 ± 2^{b}	$4{,}9 \pm 0{,}2^{b}$	$11{,}7 \pm 0{,}1^{b}$	$0{,}191 \pm 0{,}007^{b}$
	800–1000	$9{,}4 \pm 0{,}1^{a}$	172 ± 1^{a}	49 ± 1^{a}	$4{,}3 \pm 0{,}1^{a}$	$9{,}6 \pm 0{,}1^{a}$	$0{,}164 \pm 0{,}003^{a}$
Машук 510	< 250	$12{,}1 \pm 0{,}5^{b}$	185 ± 2^{b}	$60 \pm 2^{a,b}$	$4{,}5 \pm 0{,}2^{a}$	$11{,}0 \pm 0{,}1^{d}$	$0{,}201 \pm 0{,}007^{a}$
	250–670	$12{,}6 \pm 0{,}2^{b}$	175 ± 2^{a}	76 ± 2^{c}	$5{,}5 \pm 0{,}2^{b}$	$7{,}6 \pm 0{,}1^{b}$	$0{,}255 \pm 0{,}007^{b}$
	670–800	$10{,}9 \pm 0{,}1^{a}$	175 ± 2^{a}	64 ± 2^{b}	$4{,}7 \pm 0{,}2^{a}$	$7{,}3 \pm 0{,}1^{a}$	$0{,}215 \pm 0{,}007^{a}$
	800–1000	$10{,}5 \pm 0{,}1^{a}$	173 ± 1^{a}	59 ± 1^{a}	$4{,}5 \pm 0{,}1^{a}$	$8{,}0 \pm 0{,}1^{c}$	$0{,}210 \pm 0{,}004^{a}$

Данные представлены как $M \pm SD$ ($n = 3$). Разные надстрочные буквы указывают на статистически значимые различия между фракциями крупы в пределах одного гибрида кукурузы и одного показателя по результатам теста Тьюки ($p < 0{,}05$). Одинаковые буквы указывают на отсутствие статистически значимых различий.

Этот эффект хорошо прослеживается в Таблице 1 с режимами экструзионной обработки крупы из зерна гибридов кукурузы. Например, при близких заданных температурах (160–185 °C) значения крутящего момента, давления и удельной механической энергии (SME) заметно различаются в зависимости от гибрида и размера частиц. Так, у гибрида К 500 для фракции < 250 мкм SME достигает 0,268 ± 0,007 кВт·ч/кг, а крутящий момент — 80 ± 2 %, тогда как у крупной фракции (800–1000 мкм) SME снижается до 0,164 ± 0,003 кВт·ч/кг. Это говорит о том, что рассеивание тепла напрямую связано с физическими свойствами сырья, и фактический температурный режим всегда является результатом совместного действия внешнего нагрева и внутреннего тепловыделения [21].

Данные, представленные в Таблице 1, свидетельствуют, что большие значения показателя коэффициента расширения имели экструдаты из крупы с гранулометрическим составом 800–1000 мкм зерна всех гибридов кукурузы, по сравнению с экструдатами из крупы фракций с меньшими размерами частиц.

Коэффициент расширения экструдатов зависит от свойств сырья и способности материала сохранять пористую структуру после выхода из фильеры. В работе группы египетских и индийских ученых показано, что влажность исходной смеси играет ключевую роль: при низкой влажности (14 %) деструкция крахмала максимальна, что способствует высокому расширению, а с увеличением влажности (до 22 %) коэффициент расширения снижается. Это согласуется с данными, полученными при экструзии различных гибридов кукурузы (Таблица 1). У образцов с низкой влажностью (9,4–10,5 %) коэффициент расширения достигает 11–12, тогда как при более высокой влажности (11–12 %) значения коэффициента расширения снижаются до 5–8. Также заметно влияние размера частиц: самые мелкие фракции (< 250 мкм) дают высокие значения коэффициента расширения при относительно высокой удельной механической энергии. Это подтверждает, что как влажность, так и структурные характеристики сырья определяют степень парообразования и стабильность пористой структуры после выхода из экструдера [17].

В результате экспериментов было установлено, что экструдаты, полученные из крупы зерна гибридов кукурузы Белозерный 250, Белозерный 300 и Янтарный, имели низкий коэффициент расширения, что негативно отражалось на текстуре экструдатов, следовательно, их использование в экструзионной обработке не целесообразно. Максимальный показатель коэффициента расширения (12,0 ± 0,2) установлен в экструдате из крупы с размером частиц 250–670 мкм, полученном из зерна гибрида К 500. Экструзионная обработка крупы с размером частиц 250–670 мкм происходила при меньшем крутящем моменте (52 ± 1 %) и давлении в шнековой камере экструдера — 4,9 ± 0,2 МПа, что обеспечило меньшую затраченную удельную энергию (0,174 ± 0,003 кВт·ч/кг) по сравнению с обработкой других образцов крупы кукурузы. Установлены высокие показатели коэффициента расширения экструдатов других фракций крупы из зерна гибрида К 500, что указывает на целесообразность применения продуктов его переработки в пищевых технологиях.

4. Заключение

Важнейшими технологическими свойствами крахмалосодержащего сырья являются термодинамические параметры биополимеров при температурном воздействии. Определяли температуру клейстеризации, а также пиковую, минимальную и конечную вязкости крахмальной суспензии при заданном профиле температурного воздействия.

Исследованы технологические свойства крупы различного гранулометрического состава (< 250 мкм, 250–670 мкм, 670–800 мкм и 800–1000 мкм) из зерна гибридов белозерной (Белозерный 250 и Белозерный 300) и желтозерной (К 350, Янтарный, К 500 и Машук 510) кукурузы отечественной селекции: цветовые характеристики, насыпная плотность, температура клейстеризации и вязкость крахмальной суспензии. Получены экструдаты из крупы исследуемых гибридов кукурузы и определены показатели коэффициента расширения и удельной механической энергии процесса обработки.

При исследовании цветовых характеристик в цветовом пространстве L^*, a^* и b^* установлены различия в цвете зерна разных гибридов кукурузы, что может влиять на цвет продукции, изготовленной из соответствующего зерна.

Исследования технологических свойств крупы разного гранулометрического состава позволили определить крупу всех фракций из зерна гибрида кукурузы К 500 как отличающуюся большей насыпной плотностью по сравнению с крупой из зерна других исследуемых гибридов. Структура указанной кукурузной крупы предпочтительна для экструзионной обработки вследствие более высокой максимальной насыпной плотности, что, вероятно, обусловлено цельной структурой эндосперма.

Использование ротационного вискозиметра позволило объективно оценить реологические свойства крахмалсодержащего сырья. Получаемые кривые вязкости дают возможность рассчитать ключевые параметры свойств крахмала (пиковую, конечную вязкость, степень разжижения и ретроградации), которые коррелируют с изменениями сырья при экструзии и с качеством готовых экструзионных продуктов.

Основным показателем, отражающим потребительские достоинства экструдатов, определен коэффициент расширения. Максимальный коэффициент расширения установлен для экструдата из крупы с гранулометрическим составом 250–670 мкм из зерна гибрида кукурузы К 500. Экструдаты, полученные из других исследуемых фракций крупы этого гибрида, также имели высокие значения коэффициента расширения. Следует отметить, что формирование пористой макроструктуры экструдатов из крупы зерна гибрида К 500 происходило при меньших энергетических затратах на единицу готового продукта, на что указывает показатель удельной энергии — 0,174 ± 0,003 кВт·ч/кг.

Проведенные исследования показали целесообразность использования для экструзионной обработки крупы из зерна гибридов кукурузы К 350, К 500 и Машук 510, имеющих монолитное строение эндосперма и лучшие термодинамические характеристики крахмала.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / REFERENCES

1. Gongora, I. G., Taron-Dunoyer, A., Quintana-Martinez, S. E., Garcia-Zapateiro, L. A. (2025). Physicochemical and technological properties of the starch from corn (*Zea mays*) variety P-7928. *Current Research in Nutrition and Food Science,* 13(1), 508–515. https://doi.org/10.12944/CRNFSJ.13.1.35
2. FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations) (2026). Crops and livestock products in the world. Retrieved from https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL?regions=5000&elements=2312,2510&items=809, 800, 221, 711,515,526,226,366,367,572,839,203,486,44,176,552,216,181,420,89,358,101, 568,426,217,591,378,125,265,393,108,531,220,191,459,689,401,693,698,661, 249,656,813,195,554, QC>,397,550,577,149,399,569,771,94,720,549,560,446, 406,242,225,336,677,277,780,310,263,782,592,224,407,497,201,372,333,461, 210,56,571,671,299,79,103,449,292,836,702,75,254,430,260,403,402,490,414, 558,512,821,619,234,339,542,211,723,541,161,603,463,600,534,521,187,417, 687,748,587,197,574,223,489,536,507,296,116,394,754,523,92,788,270,547, 27,71,280,328,289,789,83,530,236,373,544,423,157,156,267,122,305,495,136, 667, 388, 97, 777, 275, 826, 692, 205, 222, 567, 15, 137, 135&years=2024&output_type=table&file_type=csv&submit=true Accessed March 17, 2026
3. FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations) (2026). Crops and livestock products in Russian Federation. Retrieved from https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL?countries=185&elements=2312, 2510&items=809, 800,221,711,515,526,226,366,367,572,839,203,486,44,176,552,216,181,420,89, 358,101,568,426,217,591,378,125,265,393,108,531,220,191,459,689,401,693, 698,661,249,656,813,195,554, QC>,397,550,577,149,399,569,771,94,720,549, 560,446,406,242,225,336,677,277,780,310,263,782,592,224,407,497,201,372, 333,461,210,56,571,671,299,79,103,449,292,836,702,75,254,430,260,403,402, 490,414,558,512,821,619,234,339,542,211,723,541,161,603,463,600,534,521, 187,417,687,748,587,197,574,223,489,536,507,296,116,394,754,523,92,788,270, 547,27,71,280,328,289,789,83,530,236,373,544,423,157,156,267,122,305,495, 136,667,388,97,777,275,826,692,205,222,567,15,137,135&years=2024&output_type=table&file_type=csv&submit=true Accessed March 17, 2026
4. Лачуга, Ю. Ф., Плугатарь, Ю. В., Трубилин А. И., Макрушин, Н. М., Малько, А. М., Лукомец, В. М. и др. (2018). Современное состояние и перспективы развития семеноводства в Российской Федерации. *Труды Кубанского государственного аграрного университета*, 72, 9–24. [Lachuga, Yu. F., Plugatar, Yu. V., Trubilin, A. I., Makrushin, N. M., Malko, A. M., Lukomets, V. M. et al. (2018). Current state and prospects of the development of seed breeding in the Russian Federation. *Proceedings of the Kuban State Agrarian University*, 72, 9–24 (In Russian)]
5. Половцева, А. А., Наумцев, О. Н., Борисова, А. В. (2020). Использование кукурузной, рисовой и амарантовой муки в рецептуре безглютеновых кексов. *Известия высших учебных заведений. Пищевая технология,* 1(373), 48–52. [Polovtseva, A. A., Naumtsev, O. N., Borisova, A. V. (2020). Use of corn, rice and amaranth flour in gluten-free cupcakes recipes. *Izvestiya VUZOV. Food Technology,* 1(373), 48–52 (In Russian)] https://doi.org/10.26297/0579-3009.2020.1.13
6. Журавель, Н. В., Чумакова, В. В., Мартиросян, В. В. (2012). Зерновой амарант — перспективная культура. *Достижения науки и техники АПК*, 10, 71–72. [Zhuravel, N. V., Chumakova, V. V., Martirosyan, V. V. (2012). Grain amaranth -culture perspective. *Achievements of Science and Technology in Agro-Industrial Complex,* 10, 71–72 (In Russian)]
7. Kaur, S., Kumar, K., Singh, L., Sharanagat, V. S., Nema, P. K., Mishra, V. et al. (2024). Gluten-free grains: Importance, processing and its effect on quality of gluten-free products. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 64(7), 1988–2015. https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2119933
8. Liedike, B., Khatib, M., Tabarsi, B., Harris, M., Wilson, S. L., Ortega-Santos, C. P. et al. (2024). Evaluating the effects of corn flour product consumption on cardio-

metabolic outcomes and the gut microbiota in adults with elevated cholesterol: A randomized crossover. *Journal of Nutrition*, 154(8), 2437–2447. https://doi.org/10.1016/j.tjnut.2024.06.003
9. Lopes, T., Zemlin, A. E., Hill, J., Mchiza, Z. J., Peer, N., Erasmus, R. T. et al. (2022). Consumption of plant foods and its association with cardiovascular disease risk profile in South Africans at high-risk of type 2 diabetes mellitus. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(20), Article 13264. https://doi.org/10.3390/ijerph192013264
10. Alto Consulting Group (ACG) (2025). Новости рынков: Производство продуктов зерновых для завтрака в России 2024: ключевые итоги и тенденции. Электронный ресурс https://alto-group.ru/new/11793-proizvodstvo-produktov-zernovyh-dlja-zavtraka-v-rossii-2024-kljuchevye-itogi-i-tendencii.html Дата доступа 13.11.2025 [Alto Consulting Group (ACG) (2025). Market news: Manufacturing breakfast cereals in Russia, 2024: Key results and trends. Retrieved from https://alto-group.ru/new/11793-proizvodstvo-produktov-zernovyh-dlja-zavtraka-v-rossii-2024-kljuchevye-itogi-i-tendencii.html Accessed November 13, 2025 (In Russian)]
11. Sahu, C., Patel, S. (2021). Optimization of maize-millet based soy fortified composite flour for preparation of RTE extruded products using D-optimal mixture design. *Journal of Food Science and Technology,* 58, 2651–2660. https://doi.org/10.1007/s13197-020-04771-1
12. Бахчевников, О. Н., Брагинец, С. В. (2020). Экструдирование растительного сырья для продуктов питания (обзор). *Техника и технология пищевых производств,* 50(4), 690–706. [Bakhchevnikov, O. N., Braginets, S. V. (2020). Extrusion of plant raw materials in food production: A review. *Food Processing: Techniques and Technology*, 50(4), 690–706. (In Russian)] https://doi.org/10.21603/2074-9414-2020-4-690-706
13. Малкина, В. Д., Мартиросян, В. В., Жиркова, Е. В. (2013). Модификация свойств растительного сырья в процессе экструзионной обработки. Пятигорск: РИА-КМВ, 2013. [Malkina, V. D., Martirosyan, V. V., Zhirkova, E. V. (2013). Modification of properties of plant raw materials during extrusion processing. Pyatigorsk: RIA-KMV, 2013 (In Russian)]
14. Алексеев, Г. В., Савельев, А. П., Бирченко, А. А., Ивлева, Е. Н. (2024). Возможности повышения качества экструдированных кукурузных крахмалов. *Ползуновский вестник,* 3, 55–61. [Alekseev, Г. В., Saveliev, A. П., Birchenko, A. A., Ivleva, E. H. (2024). Possibilities of improving quality of extruded corn starches. *Polzunovskiy Vestnik*, 3, 55–61 (In Russian)] https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2024.03.008
15. Комышев, Е. Г., Генаев, М. А., Афонников, Д. А. (2020). Анализ цветовых и текстурных характеристик зерен злаков на цифровых изображениях. *Вавиловский журнал генетики и селекции*, 24(4), 340–347. [Komyshev, E. G., Genaev, M. A., Afonnikov, D. A. (2020). Analysis of color and texture characteristics of cereals on digital images. *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*, 24(4), 340–347. (In Russian)] https://doi.org/10.18699/VJ20.626
16. Бркич, Г. Э., Пятигорская, Н. В., Зырянов, О. А. (2020). Изучение технологических свойств фармацевтической субстанции на основе производного 3,7-диазабицикло [3.3.1] нонана. *Медико-фармацевтический журнал Пульс,* 22(3), 18–23. [Brkich, G. E., Pyatigorskaya, N. V., Zyryanov, O. A. (2020). Development of technological properties of the pharmaceutical substance based on the derivative of 3,7-diazabicyclo [3.3.1] nonane. *Medical and Pharmaceutical Journal "Pulse",* 22(3), 18–23. (In Russian)] https://doi.org/10.26787/nydha-2686-6838-2020-22-3-18-23
17. Ali, S., Singh, B., Sharma, S. (2019). Impact of feed moisture on microstructure, crystallinity, pasting, physico-functional properties and *in vitro* digestibility of twin-screw extruded corn and potato starches. *Plant Foods for Human Nutrition*, 74, 474–480. https://doi.org/10.1007/s11130-019-00762-6
18. Calderón, C., Quelal, M., Villacrés, E., Manosalvas-Quiroz, L. A., Álvarez, J., Villacis, N. (2023). Impact of extrusion on the physicochemical parameters of two varieties of corn (*Zea mays*). *AIMS Agriculture and Food*, 8(3), 873–888. https://doi.org/10.3934/agrfood.2023046
19. Sahu, C., Patel, S., Tripathi, A. K. (2022). Effect of extrusion parameters on physical and functional quality of soy protein enriched maize based extruded snack. *Applied Food Research*, 2(4), Article 100072. https://doi.org/10.1016/j.afres.2022.100072
20. Фролов, Д. И. (2019). Эффективность и энергозатраты в процессе производства кукурузных экструдатов. *Инновационная техника и технология,* 2(19), 38–42. [Frolov, D. I. (2019). Efficiency and energy consumption in the process of manufacture of corn extrudes. *Innovative Machinery and Technology,* 2(19), 38–42 (In Russian)]
21. Potter, R., Stojceska, V., Plunkett, A. (2013). The use of fruit powders in extruded snacks suitable for Children's diets. *LWT*, 51, 537–544. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2012.11.015
22. Sant'Anna, V., Gurak, P. D., Marczak, L. D. F., Tessaro, I. C. (2013). Tracking bioactive compounds with colour changes in foods — A review. *Dyes and Pigments*, 98(3), 601–608. http://doi.org/10.1016/j.dyepig.2013.04.011
23. Мамедова, Х. Р., Хатефов, Э. Б., Экинджи, Р. (2025). Изменчивость параметров цвета зерна местных сортов кукурузы Азербайджана. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 186(3), 92–101. [Mammadova, H. R., Khatefov, E. B., Ekinci, R. (2025). Variability of grain color parameters among local maize cultivars in Azerbaijan. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 186(3), 92–101 (In Russian)] https://doi.org/10.30901/2227-8834-2025-3-92-101
24. Wang, Yi., Chen, L., Yang, T., Ma, Y., McClements, D. J., Ren, F. et al. (2021). A review of structural transformations and properties changes in starch during thermal processing of foods. *Food Hydrocolloids*, 113(1), Article 106543. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106543
25. Huang, X., Liu, H., Ma, Y, Mai, S., Li, C. (2022). Effects of extrusion on starch molecular degradation, order-disorder structural transition and digestibility — A review. *Foods*, 11(16), Article 2538. https://doi.org/10.3390/foods11162538
26. Neder-Suárez, D., Quintero-Ramos, A., Meléndez-Pizarro, C. O., Zazueta-Morales, J. d. J., Paraguay-Delgado, F., Ruiz-Gutiérrez, M. G. (2021). Evaluation of the physicochemical properties of third-generation snacks made from blue corn, black beans, and sweet chard produced by extrusion. *LWT*, 146, Article 111414. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111414
27. Liu, W.-C., Halley, P. J., Gilbert, R. G. (2010). Mechanism of degradation of starch, a highly branched polymer, during extrusion. *Macromolecules*, 43(3), 2855–2864. https://doi.org/10.1021/ma100067x
28. Neder-Suárez, D., Amaya-Guerra, C. A., Pérez-Carrillo, E., Quintero-Ramos, A., Mendez-Zamora, G., Sánchez-Madrigal, M. Á. et al. (2020). Optimization of an extrusion cooking process to increase formation of resistant starch from corn starch with addition of citric acid. *Starch*, 72(3–4), Article 1900150. https://doi.org/10.1002/star.201900150
29. Antonov, Yu. A., Pletenko, M. G., Tolstoguzov, V. B. (1987). Phase state of the systems water-polysaccharide-I-polysaccharide-II. *Polymer Science U. S. S. R.*, 29(12), 2724–2729. https://doi.org/10.1016/0032-3950(87)90185-7
30. Brochard, F., De Gennes, P. G. (1983). Phase transitions of binary mixtures in random media. *Journal de Physique Lettres*, 44(18), 785–791. https://doi.org/10.1051/jphyslet:019830044018078500
31. Grosberg, A. Yu., Khokhlov, A. R. (1994). Statistical physics of macromolecules. New York. AIP Press, 1994.
32. Genkina, N. K., Kiseleva, V. I., Martirosyan V. V. (2015). Different types of V amylose-lipid inclusion complexes in maize extrudates revealed by DSC analysis. *Starch*, 67(9–10), 752–755. https://doi.org/10.1002/star.201500012
33. Huang, Q., Chen, X., Wang, S., Zhu, J. (2020). Amylose-Lipid Complex. Chapter in a book: Starch Structure, Functionality and Application in Foods. Singapore: Springer, 2020. https://doi.org/10.1007/978-981-15-0622-2_5
34. Souza, R. C. R., Andrade, C. T. (2000). Investigação dos processos de gelatinização e extrusão de amido de milho. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, 10(1), 24–30. [Souza, R. C. R., Andrade, C. T. (2000). Investigation of corn starch gelatinization and extrusion processes. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, 10(1), 24–30. (In Portuguese)] https://doi.org/10.1590/S0104-14282000000100006
35. Pulgarín, O., Larrea-Wachtendorff, D., Ferrari, G. (2023). Effects of the amylose/amylopectin content and storage conditions on corn starch hydrogels produced by high-pressure processing (HPP). *Gels*, 9(2), Article 87. https://doi.org/10.3390/gels9020087
36. Kalichevsky, M. T., Blanshard, J. M. V. (1993). The effect of fructose and water on the glass transition of amylopectin. *Carbohydrate Polymers,* 20(2), 107–113. https://doi.org/10.1016/0144-8617(93)90085-I
37. Woodbury, T. J., Mauer, L. J. (2023). Oligosaccharide, sucrose, and allulose effects on the pasting and retrogradation behaviors of wheat starch. *Food Research International,* 171, Article 113002. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.113002
38. Karakelle, B., Kian-pour, N., Toker, O. S., Palabiyik, I. (2020). Effect of process conditions and amylose/amylopectin ratio on the pasting behavior of maize starch: A modeling approach. *Journal of Cereal Science*, 94, Article 102998. https://doi.org/10.1016/j.jcs.2020.102998
39. Varghese, S., Awana, M., Mondal, D., Rubiya, M., Melethil, K., Singh, A. et al. (2022). Amylose-amylopectin ratio: Comprehensive understanding of structure, physicochemical attributes, and applications of starch. Chapter in d book: Handbook of biopolymers. Singapore: Springer, 2022. https://doi.org/10.1007/978-981-16-6603-2_48-1
40. Тарер, А. А. (2007). Физико-химия полимеров. Москва: Научный мир, 2007 [Tager, A. A. (2007). Physical chemistry of polymers. Moscow: Nauchny Mir, 2007. (In Russian)]
41. Горжанов, В. В., Герман, Н. А., Николайчик, И. В. (2025). Оценка эффективности применения крахмалов в клеильном прессе бумагоделательной машины. *Труды БГТУ. Серия 2: Химические технологии, биотехнология, геоэкология*, 1(289), 47–54. [Gorzhanov, V. V., Herman, N. A., Nikolaichik, I. V. (2025). Evaluation of the effectiveness of using starches in the size press of a paper making machine. *Proceedings of BSTU. Series 2: Chemical Engineering, Biotechnologies, Geoecology,* 1(289), 47–54. (In Russian)] https://doi.org/10.52065/2520-2669-2025-289-6
42. Yang, Y., Fu, J., Duan, Q., Xie, H., Dong, X., Yu, L. (2024). Strategies and methodologies for improving toughness of starch films. *Foods*, 13(24), Article 4036. https://doi.org/10.3390/foods13244036
43. Baran, A., Vrábel, P., Kovaľaková, M., Hutníková, M., Fričová, O., Olčák, D. (2020). Effects of sorbitol and formamide plasticizers on molecular motion in corn starch studied using NMR and DMTA. *Journal of Applied Polymer Science*, 137(33), Article 48964. https://doi.org/10.1002/app.48964

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ	AUTHOR INFORMATION
Принадлежность к организации	**Affiliation**
Сотченко Денис Юрьевич — научный сотрудник, лаборатория технологий макаронных и экструдированных продуктов, Центр реологии пищевых сред, Научно-исследовательский институт хлебопекарной промышленности 107553, Москва, ул. Большая Черкизовская, 26А E-mail: d.sotchenko@gosniihp.ru ORCID: https://orcid.org/0009-0006-3337-8060 * автор для контактов	**Denis Yu. Sotchenko**, Researcher, Laboratory of Pasta and Extruded Products Technologies, Center for Food Medium Rheology, Scientific Research Institute for the Baking Industry 26A, Bolshaya Cherkizovskaya str., 107553, Moscow, Russia E-mail: d.sotchenko@gosniihp.ru ORCID: https://orcid.org/0009-0006-3337-8060 * corresponding author
Мартиросян Владимир Викторович — доктор технических наук, профессор РАН, заместитель директора по научной работе, Научно-исследовательский институт хлебопекарной промышленности 107553, Москва, ул. Большая Черкизовская, 26А E-mail: v.martirosyan@gosniihp.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4026-5789	**Vladimir V. Martirosyan**, Doctor of Technical Sciences, Professor RAS, Deputy Director for Scientific Work, Scientific Research Institute for the Baking Industry 26A, Bolshaya Cherkizovskaya str., 107553, Moscow, Russia E-mail: v.martirosyan@gosniihp.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4026-5789
Костюченко Марина Николаевна — кандидат технических наук, директор, Научно-исследовательский институт хлебопекарной промышленности 107553, Москва, ул. Большая Черкизовская, 26А E-mail: m.kostyuchenko@gosniihp.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7854-3513	**Marina N. Kostyuchenko**, Candidate of Technical Sciences, Director, Scientific Research Institute for the Baking Industry 26A, Bolshaya Cherkizovskaya str., 107553, Moscow, Russia E-mail: m.kostyuchenko@gosniihp.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7854-3513
Балуян Хачатур Александрович — кандидат технических наук, руководитель центра реологии пищевых сред, Научно-исследовательский институт хлебопекарной промышленности 107553, Москва, ул. Большая Черкизовская, 26А E-mail: kh.baluyan@gosniihp.ru ORCID: http://orcid.org/0000-0003-3011-8846	**Khachatur A. Baluyan**, Candidate of Technical Sciences, Supervisor of the Center for Food Medium Rheology, Scientific Research Institute for the Baking Industry 26A, Bolshaya Cherkizovskaya str., 107553, Moscow, Russia E-mail: kh.baluyan@gosniihp.ru ORCID: http://orcid.org/0000-0003-3011-8846
Шариков Антон Юрьевич — кандидат технических наук, заведующий отделом оборудования пищевых производств и мембранных технологий, Всероссийский научно-исследовательский институт пищевой биотехнологии — филиал ФИЦ питания, биотехнологии и безопасности пищи 111033, Москва, Самокатная ул. 4-Б E-mail: anton.sharikov@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9483-5209	**Anton Yu. Sharikov**, Candidate of Technical Sciences, Head of the Department for Food Production Equipment and Membrane Technologies, All-Russian Research Scientific Institute of Food Biotechnology — Subdivision of the Federal Research Centre of Nutrition, Biotechnology and Food Safety 4B, Samokatnaya str., 111033, Moscow, Russia E-mail: anton.sharikov@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9483-5209
Жиркова Елена Владимировна — кандидат технических наук, доцент, базовая кафедра индустрии качеств, Российский экономический университет им. Г. В. Плеханова 115054, Москва, Стремянный пер, 36 E-mail: zhirkova.ev@rea.ru ORCID: http://orcid.org/0000-0002-8934-4162	**Elena V. Zhirkova**, Candidate of Technical Sciences, Docent, Basic Department of Quality Industry, Plekhanov Russian University of Economics 36, Stremyanny lane, 115054, Moscow, Russia E-mail: zhirkova.ev@rea.ru ORCID: http://orcid.org/0000-0002-8934-4162

Критерии авторства	Contribution
Авторы в равных долях имеют отношение к написанию рукописи и одинаково несут ответственность за плагиат.	Authors equally relevant to the writing of the manuscript, and equally responsible for plagiarism.

Конфликт интересов	Conflict of interest
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.	The authors declare no conflict of interest

DOI: https://doi.org/10.21323/2618-9771-2026-9-2-171-180

Поступила 29.01.2026
Поступила после рецензирования 22.04.2026
Принята в печать 24.04.2026
© Творогова А. А., Казакова Н. В., Ландиховская А. В., Ситникова П. Б., Ермоченков Д. М., Ананьева Н. В., 2026

https://www.fsjour.com/jour
Обзорная статья
Открытый доступ

АСПЕКТЫ УСТАНОВЛЕНИЯ СРОКОВ ГОДНОСТИ И ПОРЧИ МОРОЖЕНОГО. ОБЗОР

Творогова А. А.*, Казакова Н. В., Ландиховская А. В., Ситникова П. Б., Ермоченков Д. М., Ананьева Н. В.

Всероссийский научно-исследовательский институт холодильной промышленности, Москва, Россия

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *кристаллы льда, воздушные пузырьки, температура стеклования, окисление жировой фазы, ускоренные методы исследований, температура хранения, антиоксидантная активность*

АННОТАЦИЯ

Цель исследований — анализ подходов к установлению сроков годности мороженого, причин появления и определения его пороков в процессе производства и хранения. Структурные элементы мороженого распределяются в незамерзающей концентрированной плазме и перемещаются в ней, что в процессе длительного хранения может приводить к сращиванию кристаллов и укрупнению воздушных пузырьков. Эти процессы и окислительные изменения жировой фазы признаны основными видами порчи мороженого в процессе хранения. Установлено, что в значительной степени происходит изменение дисперсности структурных элементов мороженого при многократных колебаниях температуры в процессе хранения. В связи с этим важно установить объективные сроки годности мороженого. С учетом резерва процесс исследований по нормированию сроков годности длительный, существует необходимость их прогнозирования и определения ускоренными методами. Для достоверного анализа структурных элементов необходимо применять методы неразрушающего контроля, такие как рамановская спектроскопия, синхротронная рентгеновская томография и криосканирующая электронная микроскопия. Важным условием длительного хранения мороженого без потери качества является достижение температуры стеклования, на которую влияют низкомолекулярные вещества в продукте и скорость замораживания. Для установления эффекта стеклования в пищевых продуктах широко применяют метод дифференциальной сканирующей калориметрии. Особой нестабильностью в процессе производства из-за резкого изменения давления при выходе мороженого из фризера характеризуются воздушные пузырьки. При температурах выше минус 18 °С нестабильность воздушных пузырьков проявляется в виде диспропорционирования, слипания и дренажа. При длительном хранении мороженого взаимосвязь между воздушными пузырьками приводила к образованию каналов, изучение которых методом оптической микроскопии невозможно. В наименьшей степени при производстве мороженого учитывается химический вид порчи — окисление жировой фазы. Ведутся исследования по объективной его оценке и обоснованию методов исследования. Рассматривается возможность применения общепринятых методов определения показателей окисления — перекисного и анизидинового чисел, их совместная оценка по значению TOTEX. Реже используют спектрофотометрический метод, позволяющий с помощью тиобарбитуровой кислоты определять количество малонового диальдегида. Анализ литературы указывает на недостаточное количество данных по показателям качества мороженого при хранении и на необходимость дополнительных исследований для получения обоснованных объективных данных.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Статья подготовлена в рамках выполнения исследований по государственному заданию FGUS-2025-0003 Федерального научного центра пищевых систем им. В. М. Горбатова Российской академии наук.

Received 29.01.2026
Accepted in revised 22.04. 2026
Accepted for publication 24.04.2026
© Tvorogova A. A., Kazakova, N.V., Landikhovskaya A. V., Sitnikova, P. B., Ermochenkov, D. M., Ananyeva, N. V., 2026

Available online at https://www.fsjour.com/jour
Review article
Open access

ASPECTS OF ESTABLISHING THE SHELF LIFE AND SPOILAGE OF ICE CREAM. A REVIEW

Antonina A. Tvorogova*, Natalia V. Kazakova, Anna V. Landikhovskaya, Polina B. Sitnikova, Dmitriy M. Ermochenkov, Natalia V. Ananyeva

All-Russian Scientific Research Institute of Refrigeration Industry, Moscow, Russia

KEYWORDS: *ice crystals, air bubbles, glass transition temperature, oxidation of the fat phase, accelerated methods of investigation, storage temperature, antioxidant activity*

ABSTRACT

The aim of this research is to analyze approaches to establishing ice cream shelf life and determining its defects and the causes of their occurrence during production and storage. Structural elements of ice cream are distributed and migrate within the non-freezing concentrated plasma, which can lead to crystal fusion and the enlargement of air bubbles during long-term storage. These processes, along with oxidative changes in the fat phase, are recognized as the main causes of ice cream spoilage during storage. It has been established that the dispersion of structural elements in ice cream significantly changes with repeated temperature fluctuations during storage. Therefore, it is important to establish objective shelf life for ice cream. Given the reserve, the research process for standardizing shelf life is lengthy, necessitating its prediction and determination using accelerated methods. Reliable analysis of structural elements requires the use of non-destructive testing methods such as Raman spectroscopy, synchrotron X-ray tomography, and cryoscanning electron microscopy. A key requirement for long-term storage of ice cream without loss of quality is achieving the glass transition temperature, which is influenced by the presence of low-molecular-weight substances in the product and the freezing rate. Differential scanning calorimetry is widely used to determine the glass transition in food products. Air bubbles are particularly unstable during the production process due to the abrupt pressure change when the ice cream exits the freezer. At temperatures above –18 °C, air bubble instability

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: **Творогова, А. А., Казакова, Н. В., Ландиховская, А. В., Ситникова, П. Б., Ермоченков, Д. М., Ананьева, Н. В.** (2026). Аспекты установления сроков годности и порчи мороженого. Обзор. *Пищевые системы*, 9(2), 171–180. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2026-9-2-171-180

FOR CITATION: **Tvorogova, A. A., Kazakova, N. V., Landikhovskaya, A. V., Sitnikova, P. B., Ermochenkov, D. M., Ananyeva, N. V.** (2026). Aspects of establishing the shelf life and spoilage of ice cream. A review. *Food Systems,* 9(2), 171–180. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2026-9-2-171-180

manifests itself as disproportionation, aggregation, and drainage. During long-term ice cream storage, the interaction between air bubbles led to the formation of channels, which cannot be studied using optical microscopy. The chemical type of spoilage (oxidation of the fat phase) is taken into account to a lesser degree in ice cream production. Research is underway to objectively assess this phenomenon and validate the research methods. The possibility of using generally accepted methods for determining oxidation indicators (peroxide and anisidine values) and their combined assessment using the TOTEX value is being considered. Less commonly used is the spectrophotometric method, which uses thiobarbituric acid to determine malondialdehyde levels. A review of the literature indicates a lack of data on ice cream quality parameters during storage and the need for further research to obtain reliable, objective data.

FUNDING: The article is prepared as part of the research under the State Assignment No. FGUS-2025-0003 of Gorbatov Federal State Research Center for Food Systems of Russian Academy of Sciences.

1. Введение

Выраженная сезонность потребления и производства основного сырья для мороженого (молока и молочной продукции) вызывает необходимость его длительного хранения. В технологически развитых странах мороженое и родственные ему продукты производят и хранят в условиях единой холодильной цепи, важным условием функционирования которой является необходимость поддержания на всех этапах температуры не выше минус 18 °С [1,2].

При такой температуре доля вымороженной воды в мороженом составляет не менее 80 %, что позволяет считать этот продукт замороженным. Присутствие воды в замороженном виде препятствует протеканию химических, биохимических и микробиологических реакций [3]. Однако низкая температура, сохраняя безопасность продукта, в полной мере не предотвращает структурные изменения в нем.

Структурными элементами мороженого являются кристаллы льда, воздушные пузырьки и суспендированные частицы жира. Все структурные элементы распределяются в незамерзающей плазме, представляющей собой концентрированный раствор сахаров, солей, белков и гидроколлоидов в незамерзающей воде.

В монографии [4] отмечено, что все пищевые биологические объекты неизбежно подвергаются порче, перечислены основные виды порчи мороженого при хранении — рост кристаллов льда и лактозы и окисление жировой фазы. При этом рост кристаллов льда и лактозы относят к изменениям физической природы, окисление — химической. Кроме того, к физическим видам порчи следует отнести неизбежно происходящие изменения дисперсности воздушной фазы, принимая во внимание, что на долю этого структурного элемента в мороженом приходится наибольшая часть объема [2,5–7].

Сроки годности мороженого устанавливают не во всех странах мира. Большинство производителей стремятся как можно быстрее реализовать мороженое, не расходуя средства на обеспечение сохранности продукта.

В частности, Goff и соавторы [1] сообщают результаты опроса о продолжительности хранения мороженого в звеньях холодильной цепи: предприятие-изготовитель — 2 недели; авторефрижератор (транспортирование на оптовую базу) — 6 ч; оптовая база — 4 недели; авторефрижератор (транспортирование на предприятия розничной торговли) — 3 ч; предприятие розничной торговли — 1 неделя; бытовой холодильник потребителя — 1 неделя. Таким образом, с момента изготовления мороженого до его употребления в среднем проходит более 2 месяцев. В странах с большой территорией, в частности в России, принято указывать на упаковке более длительный срок (от 6 до 24 мес.). При установлении срока годности, рекомендуемого стандартом на производство традиционного мороженого (более 6 мес.), предприятие-изготовитель обязано обосновать его в соответствии с методическими указаниями1. Однако в этом документе срок годности мороженого предусмотрено обосновывать, как для всей молочной продукции, без учета его специфики как структурированного и жиросодержащего продукта. Состояние структуры оценивается органолептически, а биодоступность жировой фазы к окислению — только по продуктам гидролиза жира и первичным продуктам окисления (кислотное и перекисное числа).

Процедура установления сроков годности в соответствии с методическими указаниями с учетом коэффициента резерва (1,2) довольно длительная, поэтому важной задачей является прогнозирование хранимоспособности мороженого. Кроме того, в методических указаниях не предусмотрено определение показателей, характеризующих основные виды порчи мороженого (наличие органолептически ощутимых кристаллов льда и окисление жировой фазы).

[1] Санитарно-эпидемиологическая оценка обоснования сроков годности и условий хранения пищевых продуктов. Методические указания. М.: Федеральный центр госсанэпиднадзора Минздрава России, 2004.

В связи с этим целью исследований являлся анализ подходов к установлению сроков годности мороженого, причин появления и определения его пороков в процессе производства и хранения.

2. Материалы и методы

Поиск научной литературы проводили с использованием поисковых систем Web of Science, Scopus и Google Scholar, с помощью научных электронных библиотек «КиберЛенинка» и eLIBRARY, а также открытых интернет-источников. Сбор данных осуществляли на русском и английском языках по ключевым фразам с оператором «и»: мороженое, срок годности, дисперсность кристаллов льда и воздушных пузырьков, температура стеклования, окисление жировой фазы, ускоренные методы исследований, температура хранения, оценка антиоксидантной активности. По поисковому запросу найдено более 550 источников.

В ходе работы проанализированы полные тексты статей, соответствующих критериям поиска. Статьи, не относящиеся к теме исследования, отклоняли после изучения названия и аннотации.

Критерии использования публикации:

1. Публикация создана в период 2010–2023 гг.;
2. Источник проиндексирован в Web of Science, Scopus и РИНЦ;
3. Возможно выборочное включение статей, опубликованных ранее 2010 г., в случае отсутствия новых источников по заданным критериям поиска.

Критерии исключения:

- ❑ работы, не относящиеся к теме исследования;
- ❑ отсутствие полных текстов публикаций.

3. Аспекты установления длительных сроков годности мороженого

Срок годности мороженого и родственных ему продуктов в значительной степени зависит от температуры хранения. Международный институт холода рекомендует хранить мороженое при температуре минус 12 °С в течение 1 мес., минус 18 °С — 6 мес., минус 22 °С — 24 мес. [3]. Корейские ученые [8] использовали ускоренное тестирование для определения срока годности путем оценки pH, микробиологических показателей и сенсорных характеристик мороженого, применяя так называемый кинетический подход. Согласно действующему в Корее законодательству, мороженое не имеет срока годности. Исследования ученых показали, что срок годности мороженого составлял 24,27 мес. при минус 18 °С, 2,29 мес. при минус 6 °С, 0,39 мес. при минус 1 °С и 0,15 мес. при 4 °С. Результаты этого исследования демонстрируют, что установленный срок годности также может способствовать эффективному управлению характеристиками мороженого в розничной сети. Такое исследование представляется не вполне корректным, поскольку в нем не учитываются критические показатели качества мороженого в процессе хранения и рассматривается состояние продукта в недопустимых температурных режимах.

Buyck с коллегами [9] уделили внимание качеству мороженого в процессе хранения при низких температурах, применяемых лишь на незначительном количестве предприятий. Исследование проведено с целью сокращения энергозатрат на хранение при нормируемом показателе минус 28,9 °С. Исследовали влияние температур хранения минус 45,6, минус 28,9, минус 26,1 и минус 23,3 °С на показатели качества так называемого коммерческого легкого и жирного мороженого со вкусом ванили при хранении в течение 1, 19,5 и 39 недель. Размер кристаллов льда заметно не различался при одной и той же температуре для легкого и жирного мороженого. Увеличение размера кристаллов льда наблюдали в диапазоне от 19,5 до 39 мкм при всех температурах хранения, кроме минус 45,6 °С. Исследователи пришли к выводу, что производители мороженого могут экономить электроэнергию, повышая температуру в морозильных камерах с минус 28,9 до минус 26,1 °С.

Также Buyck с коллегами [9] сообщают о нормируемом значении температуры хранения мороженого минус 28,9 °С, такой же уровень установлен и в ряде других стран [1]. При высоком содержании сухих веществ, включая низкомолекулярные, при температуре минус 28,9 °С можно достичь так называемого эффекта стеклования, оказывающего заметное влияние на срок годности мороженого [10].

Процесс стеклования является объектом изучения многих исследователей. Roos [11] отметил возможность образования при замораживании пищевых продуктов некристаллических структур и указал на необходимость разработки и практического использования диаграмм состояния растворенных веществ. Диаграммы состояния являются важными инструментами для отображения физического состояния и зависящих от времени свойств замороженных объектов при различной температуре хранения. На диаграммах отражают температуры стеклования и таяния льда, которые могут быть использованы для оценки явлений кристаллизации и перекристаллизации и их скорости в замороженных продуктах. Температуры выше температуры плавления льда вызывают ускорение порчи замороженных продуктов, особенно в результате колебаний температуры во время их реализации и хранения.

Предотвратить процесс укрупнения кристаллов льда можно только при хранении мороженого при температуре ниже температуры стеклования. В водных растворах в процессе стеклования не происходит упорядочения молекул воды в кристаллическую решетку из-за высокой вязкости и, как следствие, формирования аморфного состояния среды. Температура стеклования мороженого зависит от его состава, в значительной степени от содержания сахаров и других низкомолекулярных веществ и составляет минус (23–45) °С [4]. Следовательно, в мороженом с высоким содержанием сухих веществ в производственных условиях можно обеспечить режимы хранения, вызывающие стеклование незамерзающей плазмы.

Mahato с коллегами [12] обращает внимание на то, что процесс стеклования при интенсивном охлаждении происходит при достижении термодинамического неравновесия в связи со снижением подвижности молекул. Хранение в условиях стеклования может предотвратить снижение качества в результате замораживания. Авторы провели анализ факторов, оказывающих влияние на стеклование: вид растворенных веществ, включая углеводы, содержание воды, скорость замораживания и др. Рассмотрено влияние замораживания с помощью ультразвука, высокого давления, электрического и магнитного полей на процесс стеклования.

В замороженных йогуртах (кисломолочное мороженое с йогуртом) с олигофруктозой Muzammil [13] исследовал и обосновал процесс стеклования за счет применения глицерина — вещества с низкой молекулярной массой. Введение глицерина привело к увеличению скорости таяния и к значительному снижению температуры стеклования ($P < 0{,}05$). На основании результатов исследований автор сделал вывод о целесообразности использования олигофруктозы и глицерина для улучшения текстурных свойств замороженного йогурта.

Zhao с коллегами [14] в аналитическом обзоре отметили, что, согласно некоторым исследованиям, хранение замороженных продуктов при температуре ниже температуры стеклования (T_g'), обеспечивает более высокое качество быстрозамороженных продуктов в процессе хранения вследствие снижения подвижности, а следовательно, и активности воды.

Для определения T_g' многих пищевых продуктов широко применяют метод дифференциальной сканирующей калориметрии.

Современные подходы к установлению сроков годности мороженого требуют значительных временных затрат и не в полной мере отражают основные виды порчи этого продукта. В связи с этим большинство ученых уделили внимание вопросам сокращения продолжительности тестирования и повышения достоверности результатов исследований.

Zhang с соавторами [15] провели анализ принципов и возможностей применения методов рамановской спектроскопии (спектроскопия комбинационного рассеяния) для оценки структуры замороженных продуктов. Выбор этого метода основан на том, что рамановский эффект наблюдается в свете, рассеянном от образца, а не в спектре поглощения образцом света. Поэтому рамановская спектроскопия не требует специальной подготовки образца, нечувствительна к полосам поглощения и может применяться для исследования объектов различного агрегатного состояния (твердых, жидких и газообразных) через прозрачные материалы, в частности стекло. Использование метода дает возможность достоверной оценки состояния структурных элементов.

Интерес представляет работа [16], в которой исследователи обратили внимание на необходимость сохранения полезных свойств функциональных продуктов в процессе хранения на примере одного из основных компонентов для мороженого — сухого молока, обогащенного белком, пищевым волокном и витаминами. Авторы провели исследование по ускоренному определению сроков годности этого продукта. Установлено, что при хранении сухого молока при температуре 25 °С в течение 2 мес. значение перекисного числа возросло почти в 1,5 раза, а активность липазы — почти в 2 раза. Изменениям подверглась и белковая составляющая продукта, в частности содержание свободных аминокислот возросло на 20,5 %. Показана возможность разработки методики определения сроков годности для функциональных продуктов на молочной основе длительного хранения с применением метода ускоренного старения (ASLT) и математического моделирования.

4. Дисперсность кристаллов льда в процессе производства и хранения мороженого и способы изучения их дисперсности

Учитывая, что органолептически ощутимые кристаллы льда определяют один из основных видов порчи мороженого в процессе хранения, важно достоверно оценить дисперсность этого структурного элемента не только на этой стадии, но и в процессе производства.

Процесс замораживания в производстве мороженого включает три последовательные стадии. На первой стадии смесь частично замораживают в процессе фризерования до температуры минус 4–7 °С (образуется мягкое мороженое); затем проводят закаливание, понижая температуру продукта до минус 12–18 °С в скороморозильной камере, после чего осуществляют дозамораживание в морозильной камере до температуры не выше минус 18 °С, если она не была достигнута на этапе закаливания. Процесс изготовления мороженого заканчивается при достижении температуры минус 18 °С [2].

Процесс замораживания сопровождается образованием кристаллов льда. В зависимости от факторов инициирования выделяют первичное (гомогенное и гетерогенное) и вторичное кристаллообразование [5]. При переохлаждении водных растворов в процессе фризерования образуются первичные ядра. На их образование расходуется 30–50 % воды, находящейся в продукте. Если в растворе вещества, инициирующие нуклеацию, отсутствуют, то образование ядер кристаллов считается гомогенным, если присутствуют — гетерогенным [17]. В процессе закаливания кристаллизация оставшейся воды происходит на кристаллах льда, образованных в процессе фризерования. Это вторичная кристаллизация.

Рост кристаллов льда в мороженом происходит по различным причинам и наиболее заметен при значимых колебаниях температуры [18,19].

Кристаллы льда следует рассматривать как поликристаллические образования, поэтому их структура термодинамически нестабильна из-за изменения местоположения молекул. В связи с этим сразу после образования начинается перекристаллизация кристаллов, но без изменения их массы. В работе [2] показано, что изначально кристаллы имеют форму усеченной пирамиды, которая в процессе хранения мороженого скругляется. Величина острого угла при нижнем основании пирамиды заметно увеличивается. При исследовании показателя «угол кривизны» в замороженных десертах с кокосовым маслом 10 %-ной жирности показано, что доля углов кривизны менее 60 °С через 7 мес. хранения уменьшилась практически в 3 раза.

В процессе хранения мороженого происходит не только скругление кристаллов льда, но и увеличение их размеров за счет присоединения мелких кристаллов льда из-за их более низкой способности связывать воду в незамерзающей водной фазе.

Практически все исследователи рассматривали мороженое как трехмерную структуру, состоящую из взаимосвязанных воздушной и ледяной фаз и среды — незамерзающего водного раствора солей, белков и гидроколлоидов [2, 20–22].

Учитывая значимость качественного и количественного состава льда в мороженом, большинство авторов уделяют значительное внимание вопросам образования и динамике кристаллов льда в процессе хранения. В частности, в обзоре [23] Jia с коллегами изложили теории зародышеобразования и роста кристаллов льда, рассмотрели аспекты контроля этого процесса. Представлен обзор процессов тепло- и массообмена, взаимосвязи между ростом кристаллов льда и факторами теплопередачи. Отмечено влияние на дисперсность кристаллов льда быстрого замораживания в условиях криогенных температур. Показана неизбежность влияния колебаний температуры, особенно многократных, на морфологию и дисперсность кристаллов льда. Отмечено влияние ингибиторов роста льда (белков-антифризов, полисахаридов и фенолов) и агентов, инициирующих нуклеацию. Эти компоненты адсорбируются на поверхности кристалла и препятствуют проникновению молекул воды в кристаллическую решетку. При этом обращено

внимание на необходимость разработки новых технологий замораживания и хранения мороженого, обеспечивающих высокую дисперсность кристаллов льда.

Giudici с коллегами [24] посвятили свое исследование математическому моделированию кинетики образования кристаллов льда в производственных условиях. Понижение температуры при замораживании фиксировали с помощью компьютеризированной беспроводной системы. Для определения начальной точки замерзания использован алгоритм распознавания экспериментальных кривых охлаждения. Для калибровки всего температурно-временного профиля учитывали теоретическую точку замерзания. Принимая во внимание, что рост кристаллов происходил неравномерно (более медленно в начале и конце процесса замораживания), для описания кинетики образования кристаллов льда применена модифицированная функция Гомперца. Производный анализ функции Гомперца позволил определить физические маркеры динамического образования зародышей во времени в зависимости от температуры, скорости роста кристаллов льда и степени насыщения смеси воздухом. В многомерном анализе состав продукта и параметры замораживания использовали в качестве входных переменных. Построение прогнозных моделей базировалось на численном анализе кривой охлаждения.

Bahram-Parvar [25] обратил внимание на методы, применяемые для изучения структурных элементов мороженого. В статье обсуждается потенциал разрушающих и неразрушающих методов при определении качества и характеристик мороженого и аналогичных продуктов. Подчеркнута необходимость разработки новых методов для совершенствования оценки характеристик мороженого и осуществления онлайн-тестирования продукта.

Rockett с коллегами [26] для количественной оценки кристаллов льда в мороженом использовали неразрушающий метод — рентгеновскую томографию фазовых изменений. Синхротронную рентгенографию образцов мороженого проводили в месте их нахождения (*in situ*) с использованием встроенной фазово-контрастной томографии. Томограф был размещен в специально построенной холодильной камере с точно контролируемым изменением температуры образца. Размер и распределение кристаллов льда и воздушных ячеек во время запрограммированного температурного цикла определяли с помощью 3D-количественной оценки.

Группа ученых во главе с Guo [27], используя рентгеновскую томографию, смогла подтвердить взаимосвязь между воздушной и ледяной фазами и незамерзающим водным раствором солей, сахаров и белков (плазмой), рассматривая систему как трехмерную. Используя синхротронную рентгеновскую томографию и криосканирующую электронную микроскопию, ученые исследовали состояние микроструктуры мороженого во времени и при колебаниях температуры. Это стало возможным благодаря достижениям в области синхротронной томографии, в частности использованию специальной криостадии; совершенствованию линейного фазового контраста и алгоритма обработки изображений для восстановления и шумоподавления. Исследовано влияние 0, 7 и 14 термических циклов в интервале температур от минус 15 до минус 5 °C на микроструктуру мороженого. Результаты показали, что колебания температуры мороженого вызывают укрупнение как воздушных ячеек, так и кристаллов льда. Рост кристаллов льда практически прекратился после 7 термических циклов. В это время они достигли размеров расстояний между воздушными ячейками. Процесс укрупнения воздушных пузырьков сопровождался образованием каналов. Исследователи пришли к выводу, что объемная томография в большей степени позволяет установить трехмерную морфологию и взаимосвязь фаз в мороженом, чем криосканирующая электронная микроскопия. Эти исследования позволили сделать вывод также о роли воздушных ячеек в ограничении роста кристаллов льда.

Sharqawy и соавторы [21] исследовали влияние колебаний температуры внутри двух встроенных морозильных камер разного размера при нормальных условиях эксплуатации и при размораживании. При этом использовано численное моделирование с применением модели теплообмена с переменными граничными условиями. Данные показали, что время размораживания и величина повышения температуры в процессе размораживания значительно зависят от размера морозильной камеры и характеристик холодильной установки.

Masselot с коллегами [28] использовали рентгеновское томографическое изображение фазовых изменений при изучении кристаллов льда в сорбетах. Размеры микроструктурных элементов определены с разрешением 9 мкм после термостатирования при постоянной температуре, близкой к температуре выгрузки продукта из фризера (минус 6 °C). Подтверждено, что йодид натрия усиливает контраст между незамороженным концентрированным раствором и льдом. В результате исследований получена воспроизводимая количественная оценка размеров и объемных долей кристаллов льда и пузырьков воздуха. Данные о кристаллах льда соответствовали результатам визуализации криосканирующей электронной микроскопии. Кристаллы льда составляли приблизительно 50 % объема продукта, а их средний размер достигал 60 мкм, тогда как на долю пузырьков воздуха приходилось около 6 % объема, что характеризует невысокий уровень взбитости продукта. Установлено, что рентгеновская микротомография, оснащенная термостатируемым боксом, является наиболее подходящим методом для анализа микроструктуры замороженных десертов.

Olakanmia с коллегами [29] также обосновали преимущества изучения дисперсности структурных элементов неразрушающими рентгеновскими методами. Рентгеновская микрокомпьютерная томография позволяет визуализировать внутренние микроструктуры материалов посредством создания объемных 3D-данных в различных пространственных масштабах. Малоугловое рассеяние рентгеновских лучей является эффективным неразрушающим методом, используемым для микро- или наноструктурного анализа сухих или частично гидратированных материалов, гелей и растворов. Оно применяется для изучения размера, распределения, формы и молекулярной ориентации частиц, а также структуры материала.

5. Состояние воздушной фазы в процессе производства и хранения мороженого

Изменение дисперсности воздушной фазы в процессе хранения не так ощутимо при органолептической оценке, как изменение размеров кристаллов льда, но может отразиться на состоянии структуры и вызвать порок «усадка порции». При этом сокращается расстояния между кристаллами льда и происходит их сращивание [1–3]. В связи с этим исследование состояния воздушной фазы вызывает научный и практический интерес. Определение дисперсности воздушной фазы сопряжено с необходимостью учета изменчивости пузырьков воздуха в процессе исследования. В связи с этим неслучайно в различных источниках [1,2] указывается средний достигаемый диаметр воздушных пузырьков в мороженом 40–60 мкм. В последних публикациях исследований с использованием современной техники микроскопирования и метода электронного обучения, а также обработки значительного количества объектов (не менее 200) ученые сообщают, что средний размер воздушных пузырьков не превышает 35 мкм, нередко и 20–25 мкм.

Обращает на себя внимание факт соизмеримости размеров кристаллов льда и воздушных пузырьков [2]. При этом информация об инициировании воздушными пузырьками образования кристаллов льда отсутствует.

В 2002 г. Chang и Hartel уделили особое внимание проблеме изучения состояния воздушной фазы, полученные результаты изложены в трех исследованиях [30–32]. В работе [30] наблюдали за состоянием воздушных пузырьков в мороженом, предварительно закаленном при температуре минус 28 °C, при хранении в течение 4 мес. при минус 15 °C. При температурах выше минус 18 °C наблюдали три основных механизма нестабильности воздушных пузырьков: диспропорционирование, слипание и дренаж. По мере снижения температуры хранения скорость изменения дисперсности воздушных пузырьков уменьшалась. Диспропорционирование воздушных пузырьков подавлялось введением эмульгаторов или стабилизаторов. При длительном хранении мороженого взаимосвязь между воздушными пузырьками приводила к активному образованию каналов. Однако метод оптической микроскопии невозможно применять для наблюдения за поведением каналов, поскольку истинная структура воздушных пузырьков в мороженом в этих условиях не сохраняется.

В исследовании [31] распределение воздушных пузырьков по размерам в мороженом определяли с помощью сканирующей электронной микроскопии и оптической световой микроскопии после фризерования при температуре минус 6 °C. Оба метода дали сопоставимые результаты. Средний размер воздушных пузырьков в мороженом при использовании оптической микроскопии составил 20,2 мкм, а при сканирующей микроскопии — 19,6 мкм. При последующем хранении при температуре минус 15 °C после закаливания средний размер этих структурных элементов увеличился до 40,0 мкм.

В работе [32] исследовали различные факторы, оказывающие влияние на дисперсность воздушной фазы мороженого. Установлено, что средний размер воздушных пузырьков снижается в процессе замораживания при единовременном насыщении смеси воздухом по мере повышения исходной вязкости смеси и при использовании стабилизатора. Содержание жира и эмульгатора не повлияло на размер воздушных пузырьков.

Darío и другие исследователи [33] с помощью низкотемпературной микроскопии изучали дисперсность воздушной фазы сорбета на выходе из фризера. Исследовано влияние температуры испарения охлаждающей жидкости и степени насыщения сорбета воздухом. При понижении температуры охлаждающей жидкости повышалась дисперсность воздушной фазы, однако увеличение взбитости продукта не оказало заметного влияния на этот показатель.

Влияние скорости вращения мешалки в устройстве периодического действия (мороженице) и состояния жировых частиц на средний диаметр воздушных пузырьков исследовал Masuda с коллегами [34]. Целью исследований являлось установление кинетики этих структурных элементов в процессе замораживания. При этом учитывали, что высокая скорость вращения мешалки предотвращает локальное замораживание и нежелательное затвердевание продукта в соответствии с критерием Рейнольдса. Установлена зависимость среднего размера воздушных пузырьков от скорости сдвига, обусловленной вращением мешалки. Повышение скорости сдвига приводило к плавному уменьшению размера пузырьков воздуха. Однако на более поздней стадии замораживания зафиксировано нежелательное увеличение размера пузырьков вследствие увеличения частоты их столкновений. Отмечено, что агрегация жировых шариков происходила сразу после начала замораживания водной фазы. Кроме того, увеличение скорости сдвига способствовало дестабилизации жира и, следовательно, повышению степени его агрегации, оцениваемой по распределению жировых шариков по размерам. При всех скоростях сдвига начальное увеличение скорости агрегации сопровождалось дальнейшим ее снижением, что может быть объяснено разрушением агрегатов. Исследователи сделали вывод о существенном влиянии скорости вращения мешалки на кинетику пузырьков воздуха и жировых шариков во время замораживания и необходимости учета этих процессов для определения технологических параметров, таких как время замораживания и скорость перемешивания. Такие данные необходимы при проектировании конструкции фризеров для производства мороженого. Хотя это исследование проводили с использованием оборудования емкостного типа, кинетика изменения размеров воздушных пузырьков и жировых шариков может быть применена при проектировании процесса с использованием оборудования непрерывного действия.

Eisner с другими исследователями [35] посвятили свою работу изучению способов повышения дисперсности воздушных пузырьков и влияния этого показателя на консистенцию мороженого. В частности, в качестве фактора повышения дисперсности воздушной фазы в промышленных условиях рассмотрено механическое воздействие на продукт на второй стадии фризерования после насыщения его воздухом на первой стадии. Дополнительное замораживание на второй стадии с достижением температуры не выше минус 12 °C привело к повышению нагрузки на продукт в связи с увеличением доли вымороженной воды, по мнению авторов, в 2–3 раза. По результатам исследований, максимальный средний диаметр воздушных пузырьков уменьшился с 52 до 19 мкм. Кроме воздушных пузырьков при повышенной механической нагрузке изменяется жировая фаза. Высокие усилия сдвига вызывают формирование активной сети агломерированных жировых шариков, стабилизирующих воздушную фазу. Эти структурные изменения оказывают значительное влияние на показатели качества мороженого, связанные с состоянием воздушной фазы, что подтверждается значениями термостатических характеристик.

VanWees с коллегами [36] обратили внимание на порок мороженого «усадка порции», обусловленный состоянием воздушной фазы при хранении. Несмотря на то, что усадка — это известный дефект замороженных десертов, его механизмы постоянно изучаются. Установленными причинами этого порока структуры являются низкое содержание белка и сухих веществ, излишнее насыщение продукта воздухом, условия хранения, включая колебания температуры и давления окружающей среды. Авторы предложили рассматривать усадку как процесс разрушения замороженной пены, обусловленный дестабилизацией диспергированной воздушной фазы. При этом рекомендуют учитывать состав и физические свойства поверхности раздела, а также кинетическую стабильность воздушных пузырьков в замороженной матрице. Кроме того, важно принимать во внимание влияние технологически функциональных ингредиентов и методы обработки, которые оптимизируют образование и стабилизацию замороженной пены.

Эти же авторы [37] определили зависимость дисперсности воздушной фазы от состояния кристаллов льда и жировых частиц. Установлено, что с увеличением степени насыщения замороженных продуктов воздухом размеры воздушных пузырьков и кристаллов льда снижаются, а степень дестабилизации жира повышается. Авторы убедились во взаимном влиянии состояния воздушной, жировой и ледяной фаз на термо- и формоустойчивость готового продукта.

Ранее Sofjan с соавторами [38] пришли к такому же выводу при исследовании технологически значимых показателей качества мороженого со взбитостью 80, 100 и 120 %. Аналогичные показатели взбитости мороженого часто устанавливают в продукте так называемого эконом- и премиум-класса. При исследовании мороженого, фасованного в контейнеры, при хранении в условиях температуры минус 10 °C установлено, что средний размер воздушных пузырьков первоначально увеличивается во время замораживания, затем уменьшается на ранних стадиях хранения и увеличивается до больших размеров при более длительном (до 3 мес.) хранении. В готовом продукте размер воздушных пузырьков был меньше при более высокой взбитости. Авторы предположили, что это вызвано влиянием высоких напряжений сдвига во время производства. Мороженое с наименьшей взбитостью (80 %) было тверже, чем мороженое со взбитостью 120 %, но таяло быстрее. При исследовании состояния воздушной фазы на предметном столике микроскопа авторы пришли к выводу, что более низкая температура хранения (минус 20 °C) ограничивала подвижность и растворимость воздушных пузырьков в сыворотке (плазме), так что диспропорционирование было подавлено, происходила коалесценция воздушных пузырьков, находящихся в непосредственной близости. При высокой температуре хранения (минус 6 или минус 10 °C) диспропорционирование и коалесценция усиливались из-за более высокой подвижности незамороженной сывороточной фазы. Более высокая взбитость, по мнению авторов, приводила к увеличению стабильности воздушных пузырьков во время хранения.

Таким образом, согласно результатам исследований, установлено влияние процесса фризерования на дисперсность воздушной фазы, что сказывается на состоянии этого структурного элемента в процессе хранения. Исследования подтверждают целесообразность рассмотрения состояния воздушной фазы в совокупности с состоянием жировой фазы. Установлено, что с увеличением степени насыщения замороженных продуктов воздухом размеры воздушных пузырьков снижаются, а степень дестабилизации жира повышается. Однако снижение дисперсности воздушной фазы происходит не только в процессе хранения, но и на стадии выхода мороженого из фризера.

6. Исследование окислительной порчи липидов при хранении мороженого

6.1. Окислительная стабильность липидов в мороженом, обогащенном полиненасыщенными жирными кислотами

С точки зрения технологических аспектов производства и пищевой ценности мороженого предпочтение отдается применению жиросодержащих продуктов с различной степенью насыщенности триглицеридов. Для производства рационально использовать насыщенные жиры, а с позиций здорового питания — ненасыщенные жиры, характеризуемые высокой способностью к окислению.

Проблема окисления липидов стала особенно актуальной в связи с развитием тенденции здорового питания, одним из направлений которого стало стремление к употреблению продуктов с ненасыщенными жирными кислотами. Hu с соавторами отмечает пользу ненасыщенных жирных кислот, отсутствие способности организма человека их синтезировать и чувствительность к окислению [39]. Продукты окисления жиров снижают качество (в связи с образованием посторонних привкусов и неприятных запахов) и биологическую ценность пищи (из-за потери незаменимых жирных кислот и окисления белков и витаминов). В связи с этим необходимы мониторинг процесса окисления жиров и контроль качества продукции в процессе хранения. При этом особое внимание уделяется методам исследования, используемым в пищевой промышленности.

Биологическая ценность полиненасыщенных жирных кислот, в частности омега-3, обусловлена положительным влиянием на организм человека и на его физическую активность [40]. Важным источником омега-3 кислот является льняное масло [41–43].

Влияние обогащения мороженого омега-3 жирной кислотой, в частности α-линоленовой кислотой льняного масла, вносимого в виде микрокапсул в количестве 3, 4 и 5 %, исследовал Gowda и др. [41]. Для нивелирования привкуса льняного масла использовали ароматизаторы (ваниль, сливочное виски и клубника). Данные показали, что количество свободных жирных кислот значительно увеличилось в течение первых 15 дней во всех образцах, а затем оставалось постоянным. Содержание перекиси и тиобарбитуровой кислоты повышалось в течение времени с 30-го по 45-й день;

затем снижалось с последующим постепенным увеличением к 120 дню. Профиль жирных кислот показал снижение содержания α-линоленовой кислоты в обогащенном мороженом на 18,74–21,38% через 120 дней. В порции свежеприготовленного мороженого функциональной направленности массой 100 г было обеспечено около 45% суточной нормы α-линоленовой кислоты (1,4 г в день). Содержание этой кислоты снизилось на 35,37–36,56% в конце хранения, т.е. через 120 дней. Сделан вывод, что жирнокислотный состав мороженого был устойчив к окислению на протяжении всего периода хранения, и его можно было успешно обогащать льняным маслом в количестве до 4% (по массе).

Согласно данным других исследователей, допустимый уровень применения льняного масла для замены молочного жира составляет 2,5% [42]. Установлено, что добавление льняного масла не оказало влияния на физико-химические свойства мороженого. Однако оно повлияло на консистенцию (мороженое стало менее кремообразным). Газохроматографический анализ показал, что содержание жирных кислот при хранении несколько уменьшилось, что свидетельствует об изменениях, происходящих в жировой фазе продукта.

Льняное масло в качестве источника омега-3 кислот использовали в мороженом с дополнительным введением витамина Е и без него для частичной замены молочного жира (1,5, 2,5, 5,0 и 7,5%) [43]. В двух сериях опытов установлено, что термоустойчивость мороженого снижалась при увеличении содержания льняного масла, а способность к насыщению воздухом и вязкость смеси возрастали. Отмечено, что содержание перекисей и свободных жирных кислот меньше в образцах с витамином Е.

Для обогащения мороженого в качестве источника омега-3 жирных кислот также использовано масло чиа [44]. Исследователи исходили из того, что семена чиа (*Salvia hispanica* L.) являются источником полиненасыщенных омега-3 жирных кислот, улучшающих работу сердца, печени и обладающих гипотензивной, противоаллергической и противодиабетической активностью. Концентрация омега-3 жирных кислот в масле чиа была повышена путем его фракционирования и получения легкоплавкой олеиновой фракции. В результате исследования определено влияние олеиновой фракции масла чиа в различных концентрациях на содержание омега-3 жирных кислот, окислительную стабильность и органолептические характеристики мороженого с заменой 5, 10, 15 и 20% молочного жира. Образцы анализировали через 0, 30 и 60 дней хранения. Определяли профиль жирных кислот, общее содержание фенолов, общее количество флавоноидов, свободных жирных кислот, перекисное и анизидиновое числа и сенсорные характеристики образцов мороженого. Установлено, что концентрация α-линоленовой, эйкозапентаеновой, докозапентаеновой и докозагексаеновой кислот в экспериментальном образце составила 13,24, 0,58, 0,42 и 0,31% соответственно, а активность 2,2-дифенил-1-пикрилгидразила в отношении свободных радикалов — в 13 раз больше, чем в контрольном образце. После 60 дней хранения в образце 4 наблюдалось самое высокое содержание перекиси — 1,84 мэкв O_2/кг, что значительно меньше допустимого предела — 10 мэкв O_2/кг. Оценка вкуса через 30 дней хранения существенной разницы между образцами не показала. Таким образом, установлено, что дополнительное введение олеиновой фракции масла чиа повысило содержание омега-3 жирных кислот и улучшило антиоксидантные свойства мороженого.

Существует опыт применения в качестве источника омега жирных кислот рыбы, хотя исследователи понимали возможность сенсорного невосприятия такого рода десерта у потребителей [45]. С помощью компьютерных программ в качестве оптимального варианта было выбрано мороженое с содержанием 2,5% рыбьего жира. Экспериментальный и контрольный образцы были стабильны, характеризовались схожими сенсорными показателями после изготовления и через 4 мес. хранения. Сенсорные характеристики и окислительная стабильность по показателям «содержание свободных жирных кислот» (FFA), «перекисное число», «анизидиновое число» и «общий уровень окисления жиров» (TOTOX) контрольного и обогащенного образцов были изучены в течение 4 мес. хранения при температуре минус 18 °C. Содержание перекисей (0,21–0,51 мэкв O_2/кг), значение анизидинового числа (4,61–8,12) и TOTOX (5,14–8,75) в контрольных и обогащенных образцах, по мнению авторов, были в пределах допустимых уровней, указывающих на стабильность прототипов при хранении в замороженном виде. При этом значение анизидинового числа в 1,5–2 раза превышало уровень показателя в свежем жире (не более 3). Согласно результатам, исследователи сделали вывод, что пищевая ценность мороженого может быть повышена за счет обогащения рыбьим жиром, содержащим жирные кислоты группы омега-3, при условии контроля окислительной стабильности липидов.

Для предотвращения процесса окисления используют ингредиенты с антиоксидантными свойствами, в частности масло семян масличной моринги и ликопин [46–48].

В работе [46] исследовали возможность повышения стабильности жировой фазы к окислению в мороженом путем применения переэтерифицированного масла семян масличной моринги, известного стабильным состоянием липидов. Особенностью масла являлась высокая температура плавления (35,6 °C) при значительном количестве ненасыщенных жирных кислот. В мороженом с массовой долей жира 10% часть жира заменяли переэтерифицированным маслом масличной моринги в количестве 10, 20 и 30%. Содержание олеиновой кислоты увеличилось с 26,55 до 31,69, 36,94 и 42,15% в соответствии с уровнем замены. Добавление в мороженое переэтерифицированного масла моринги ингибировало процесс автоокисления в течение 3 мес. хранения ($P < 0,05$). Потеря олеиновой и линолевой кислот в свежем и хранящемся в течение 3 мес. контроле и образце с заменой 20% жира на масло моринги составила 26,55, 24,15, 26,39% и 1,93, 1,24, 1,79% соответственно. Перекисное число хранящегося в течение 3 мес. контроля и образца с максимальной заменой жира на масло моринги составило 1,12 и 0,39 мэкв O_2/кг соответственно.

Стабильность жировой фазы к окислению может быть повышена при использовании сливочного масла с антиоксидантами. Использование в производстве сливочного масла ликопина — антиоксиданта каратиноидного происхождения — рассмотрено в работе [47]. Установлено, что количество перекисей и свободных жирных кислот в контрольных образцах по сравнению с продуктами, обогащенными ликопином, значительно выше. Авторы объясняют это тем, что ликопин как антиоксидант замедляет появление неприятного привкуса и изменение цвета сливочного масла и мороженого, поскольку он прерывает цепочку свободных радикалов, участвующих в автоокислении. Заметное отличие сенсорных показателей в образцах отмечено на 4-м месяце хранения.

Установлена антиоксидантная активность сока сахарного тростника [48]. В мороженое добавляли 20, 40 и 60% сока сахарного тростника. Содержание сахарозы во всех вариантах составляло 13%. Активность 2, 2-дифенил-1-пикрилгидразила (вещества, способного поглощать свободные радикалы) в образцах мороженого увеличивалась по сравнению с контролем в 2,9, 6,6 и 9,8 раза. Установлено, что добавление в мороженое сока сахарного тростника в количестве 20 и 40% ингибировало окисление ненасыщенных жирных кислот в процессе хранения в течение 180 дней, не влияя на органолептические характеристики.

Известно исследование по использованию в качестве антиоксидантов и ароматизаторов в мороженом эфирных масел тимьяна, базилика и майорана. Их состав исследован методом газовой хроматографии, определена антиоксидантная активность [49]. Установлено, что эфирное масло базилика имеет самую высокую восстанавливающую способность, а эфирное масло майорана — более высокую антиоксидантную способность. Эфирное масло базилика показало значительное увеличение активности поглощения H_2O_2 по сравнению с другими протестированными эфирными маслами. Незначительные различия наблюдали в физико-химических свойствах мороженого с эфирными маслами по сравнению с контрольным образцом. Сделан вывод, что эфирные масла базилика, майорана и тимьяна обладают антиоксидантным действием и могут использоваться в качестве натуральных антиоксидантов и ароматизаторов.

Учитывая актуальность применения антиоксидантов в пищевой отрасли, большое внимание уделяется объективной оценке их эффективности. Frankel и Meyer [50], а также Li [51] с коллегами достоверно оценили ситуацию с исследованием активности антиоксидантов в пищевой отрасли. В работе [50] отметили, что активность антиоксидантов в продуктах питания и биологических системах зависит от множества факторов, в том числе от коллоидных свойств субстратов, условий и стадий окисления, а также от локализации антиоксидантов в различных фазах. Поэтому при тестировании природных антиоксидантов *in vitro* важно учитывать состав системы, тип окисляемого субстрата, способ ускорения окисления, методы оценки окисления и способы количественной оценки антиоксидантной активности. Эффективность антиоксидантов также определяется гетерогенностью и гетерофазной природой системы, типом липидного субстрата, включая его физико-химическое состояние и степень ненасыщенности, типами инициаторов, в частности переходных металлов, другими компонентами и их возможным взаимодействием. По этой причине не может быть быстрого способа определения антиоксидантной активности. Каждую оценку следует проводить при различных условиях окисления, используя несколько методов для количественного определения различных продуктов окисления.

Большинство природных антиоксидантов и фитохимикатов многофункциональны, что требует измерения более чем одного свойства, относящегося либо к пищевым продуктам, либо к биологическим системам. В связи с этим существует острая необходимость в стандартизации вопросов тестирования антиоксидантов. Для получения информации о химических изменениях, которая может быть напрямую связана с окислительной порчей продуктов питания и биологических систем, следует использовать несколько наиболее специфических методов. В работе [51] дополнительно отмечено, что для получения достоверных результатов следует применять несколько тест-систем. Важно на государственном уровне обеспечить научную основу для будущих исследований по скринингу антиоксидантов в продуктах питания и системах организма.

6.2. Изыскание достоверных методов исследования окислительной способности липидов в мороженом

Методы оценки окисления липидов подробно рассмотрены в обзоре [52]. В статье сравниваются методы, используемые для оценки окисления липидов и антиоксидантной способности пищевых продуктов. Разработанные методы оценки окисления липидов основаны на прямом или косвенном измерении продуцируемых веществ первичного или вторичного окисления. Перекисные показатели и методы конъюгированного диена определяют первичные продукты окисления липидов и обычно используются для растительных масел и продуктов с высоким содержанием жира. Вещества, реагирующие с 2-тиобарбитуровой кислотой, и хроматографические методы используются для определения вторичных продуктов окисления и подходят для мяса и мясопродуктов. Флуорометрический и сенсорный анализы являются косвенными методами. Антиоксидантная способность добавок определяется косвенно с использованием методов оценки окисления липидов, упомянутых ранее, или непосредственно на основе активности антиоксидантных соединений по предотвращению образования свободных радикалов. В каждом методе оценки окисления липидов и антиоксидантной способности применяются разные подходы, и один метод не может быть использован для всех пищевых продуктов. Следовательно, выбор надлежащих методов для конкретных пищевых продуктов важен для точной оценки окисления липидов или антиоксидантной способности.

Необходимость нормирования допустимой степени окисления жира в мягком и закаленном мороженом обоснована в работе [53]. Авторы пользовались спектрофотометрическим способом, позволяющим с помощью тиобарбитуровой кислоты определять количество малонового диальдегида. В результате химической реакции между этими веществами образуется аддукт розового цвета. Его количество определяют при длине волны 535 нм. В этом исследовании сообщается о предполагаемом расходе малонового диальдегида 4,251 мкг/кг. Несмотря на противоречивые литературные данные о целесообразности применения этого метода, он нашел наиболее широкое распространение.

Практика исследования малонового альдегида отражена и в более ранних работах Okafor и его коллег [54]. Они обнаружили малоновый диальдегид во всех исследованных образцах мороженого в количестве от 1,79 ± 0,13 до 9,11 ± 2,67 мкг/мл.

Однако Papastergiadis с коллегами [55] высказали мнение о неприменимости метода, предполагающего наличие малонового альдегида, для количественной оценки окислительной порчи жира в мороженом. В этом исследовании количество аддукта, получаемого при взаимодействии извлеченного из продуктов малонового альдегида и тиобарбитуровой кислоты, определяли спектрофотометрически при длине волны 532 нм. Однако параллельное исследование аддукта методом высокоэффективной жидкостной хроматографии в сочетании с флуоресцентным детектированием показало, что спектрофотометрический метод показывает завышенные результаты по содержанию малонового альдегида. Авторы высказали мнение, что причиной завышенных значений является влияние не только вторичных, но и других продуктов окисления липидов.

Метод ускоренного определения перекисей в маслах и жиросодержащих продуктах изложен в статье [56]. Этот метод позволяет быстро оценить перекисное окисление липидов колориметрическим способом без нагревания и сложных инструментальных процедур. При длине волны 500 нм можно установить содержание перекисей, синтезирующихся при окислении липидов, определяя количество пигмента, образующегося под действием пиридоксина из 5-сульфосалициловой кислоты и Fe^{3+} (образуется из Fe^{2+} при наличии перекисей). Реактив содержал 70 % (по объему) Fe^{2+} (4 ммоль/л), 5-сульфосалициловой кислоты (40 ммоль/л) и пироксидина (18 ммоль/л). Предел количественного определения Fe^{3+} составляет 0,087 ммоль/л с приемлемой воспроизводимостью. Предложенный ускоренный метод позволил получить результаты, характеризуемые линейной корреляцией как с традиционным методом с использованием тиобарбитуровой кислоты (R^2 = 0,9999), так и с методом феррицианидного тиоцианата (R^2 = 0,9675).

Жирнокислотный состав молочного жира непостоянен и зависит от ряда факторов. Gonzalez и др. [57] уделили внимание изменению значения перекисного числа в процессе хранения мороженого с модифицированным составом жировой фазы с доминированием ненасыщенных жирных кислот — линолевой и олеиновой. Важно, что три образца молочного жира (высокоолеиновый, высоколинолевый и контрольный) получены путем модификации рационов питания коров голштинской породы. Мороженое и сливочное масло получены из молочного жира от коров в каждой диетической группе. Изначально все жиросодержащее молочное сырье характеризовалось значением перекисного числа, типичного для свежего молочного жира. В процессе хранения мороженого значение перекисного числа варьировало в диапазоне от 2,91 до 4,12 мэкв/кг. Однако авторы предостерегают, что низкое содержание перекиси, особенно после нескольких месяцев хранения, не означает, что окисления не произошло. Количество перекисей увеличилось (P > 0,05) после 2 мес. хранения продукта. На начальных этапах их количество увеличивалось медленно, но в конце индукционного периода концентрация перекиси быстро возрастала, а затем снижалась. Такую динамику наблюдали при измерении содержания перекиси на поздних стадиях хранения (от 3 до 9 мес.) для всех образцов. Наибольшее значение перекисного числа достигнуто в образце с доминированием линолевой жирной кислоты (> 15 мэкв/кг масла). По мнению некоторых авторов, содержание перекиси в свежих жирах должно составлять менее 1 мэкв/кг масла. При этом уровне в молочном жире не ощущается постороннего привкуса. После очистки и хранения в маслах и жирах допустимо содержание перекиси 10 мэкв/кг масла до появления неприятных привкусов. Пороговое значение содержания перекиси, соответствующее появлению неприятного привкуса, составляет от 20 до 50 мэкв/кг масла. Согласно данным Международной федерации молочных продуктов, стандартное содержание перекиси в молочном жире составляет 0,2 мэкв O_2/кг жира. Авторами отмечено, что изменение степени ненасыщенности молочного жира может повлиять на характеристики плавления и скорость окисления, что приведет к проблемам с качеством молочных продуктов.

Shiota и др. [58] исследовали фотоокисление молочного жира в количестве 14,25 % в мороженом, приготовленном из 7 источников жира различного состава. Проводили сенсорную оценку на наличие окисленного привкуса и мониторинг образования гидропероксида. Установлен широкий диапазон окислительной устойчивости к воздействию света, а вкусовые ощущения были связаны с содержанием перекиси (коэффициент корреляции 0,795). На фотоокислительную стабильность жира мороженого в основном повлияли содержание рибофлавина и восприимчивость масла к фотоокислению. Вклад этих факторов в соответствии с моделью множественной регрессии составил 53,7 и 17,6 % соответственно. Фотоокислительная стабильность масляной фракции повышалась с увеличением соотношения гомологов токоферола γ-токоферола/α-токоферола (коэффициент корреляции 0,846). Кроме того, на фотоокислительную стабильность мороженого влияло количество свободного жира.

В работе [59] приводятся данные по жирнокислотному составу и способности к окислению жира в мороженом с содержанием жира 13 %, изготовленном из молока коров и буйволиц. Установлено, что содержание триглицеридов от C_{26} до C_{36} было значительно выше в мороженом из молока буйволиц, чем в мороженом из коровьего молока. Содержание ненасыщенных жирных кислот в образцах мороженого из коровьего и буйволиного молока составило 24,4 и 29,9 % соответственно. Общая антиоксидантная способность мороженого из молока буйволиц была на 18 % выше, чем в мороженом из коровьего молока. Возможно, это связано с более высоким содержанием витаминов А и Е в молоке буйволиц. Мороженое из молока буйволиц характеризовалось более низким содержанием перекиси и более высокой окислительной стабильностью по сравнению с коровьим молоком. Индукционный период жира мороженого из коровьего и буйволиного молока составил 8,55 и 10,79 ч без каких-либо различий во вкусовых свойствах обоих видов мороженого.

В работе [60] исследовали влияние легкоплавких фракций молочного жира на его окислительную стабильность в мороженом. Сливки фракционировали при трех различных температурах (25, 15 и 10 °C).

Фракции по отдельности добавляли в мороженое, в качестве контроля использовали мороженое с немодифицированным молочным жиром. Мороженое хранили при температуре минус 18 °C в течение 6 мес. и отбирали пробы каждые 30 дней. Фракционирование вызывало значительные изменения в жирнокислотном составе всех фракций. В легкоплавких фракциях была повышена концентрация короткоцепочечных и длинноцепочечных ненасыщенных жирных кислот. Перекисное число при использовании фракции молочного жира, выделенной при 10 °C, увеличилось с 0,23 до 3,95 мэкв/кг, анизидиновое число — с 3,87 до 8,04. Следует отметить, что в этом исследовании использовали молочный жир из сырья длительного хранения, поскольку значение анизидинового числа было более 3. Но все же авторы сделали вывод о том, что с учетом результатов органолептической оценки в состав мороженого можно добавлять молочный жир с низкой температурой плавления, чтобы повысить его пищевую ценность при условии хранения продукта не более 2 мес. при температуре не выше минус 18 °C.

Методы определения жирнокислотного состава мороженого постоянно совершенствуются. В статье [61] предложено использовать разработанный исследователями метод определения бутиловых эфиров жирных кислот, при котором извлеченные свободные жирные кислоты преобразуются в бутиловые эфиры перед газовой хроматографией с плазменно-ионизационным детектированием. Метод всесторонне протестирован для определения линейности (20–700 мг/л; R^2 > 0,9964), пределов обнаружения (5–8 мг/л), пределов количественного определения (15–20 мг/л), точности (1,6–5,4% относительной погрешности), межсуточной воспроизводимости (4,4–5,3% относительного стандартного отклонения) и внутрисуточной воспроизводимости (0,9–5,6% относительного стандартного отклонения) для каждой отдельной свободной жирной кислоты. Всего проанализировано 17 образцов молочных продуктов, в том числе мороженого, различающихся по составу, содержанию жира и степени липолиза. Этот метод сравнили с методом прямого впрыскивания в колонку и методом метиловых эфиров жирных кислот. Выявлены преимущества предложенного метода, в частности более высокая точность определения содержания короткоцепочечных свободных жирных кислот в связи с отсутствием поглощения их в колонке или разрушением.

Метод определения метиловых эфиров для определения подлинности и содержания молочного жира используется и в России, в частности в ГОСТ 31663-2012[2], [62]. Кроме определения свободных жирных кислот в молочной продукции важно проводить количественную оценку содержания свободного жира. Его наличие может быть нежелательным или необходимым в определенных количествах, как в мороженом.

Этой проблеме было уделено внимание в статье [63], посвященной разработке нового метода определения свободного жира в эмульсиях, основанного на способности жирорастворимого красителя окрашивать системы «вода в масле». По величине поглощения света определяли изменение концентрации красителя, что позволило рассчитать количество неэмульгированного жира. Перед использованием краситель вводили в кукурузное масло. Отсутствие вероятности проникновения красителя в жировую фазу эмульсии «масло в воде» определяли на модельных образцах, в которых жировая фаза была стабилизирована поверхностно-активными веществами. С помощью этого метода количественно оценена дестабилизация молочного жира в мороженом после замораживания. Содержание свободного жира в мороженом особенно важно учитывать при хранении в виду его биодоступности.

В последние годы возрастает интерес к ускоренным методам определения окислительной стабильности жировой фазы в пищевой продукции [64,65], в России разработаны ГОСТ 31758-2012[3] и ГОСТ 34815-2021[4].

Tsao с коллегами [64] с помощью OXITEST провели анализ окислительной стабильности жира 10 образцов масла, выделенного прессом из семян масличных культур. Образцы масла в количестве 5 г подвергали воздействию кислорода под давлением 800 кПа. Реакция автоокисления масел в системе ускоренного тестирования следовала кинетике Аррениуса нулевого порядка (R^2 > 0,99). Срок годности отжатых масел при температуре 25 °C оценен путем экстраполяции в диапазоне 105–1089 дней. Полученные сроки годности значительно коррелировали со значениями логарифмического периода индукции (r > 0,81, p < 0,05) и с содержанием ненасыщенных жирных кислот (r < минус 0,69, p < 0,05), но не со значениями йодного и кислотного чисел или точкой дымления. Диаграммы рассеяния между сроками годности и содержанием ненасыщенных жирных кислот предполагают, что исследуемые масла можно сгруппировать по двум кривым линейной регрессии (r > 0,98, p < 0,05). Авторами разработаны прогностические уравнения с использованием множественной линейной регрессии с предикторными переменными «содержание ненасыщенных жирных кислот» и потенциально влияющим фактором — содержание токоферола (r > 0,88, p < 0,05). Результаты исследований этих авторов показали корреляцию содержания ненасыщенных жирных кислот со сроками годности масел семян по оценке OXITEST. По результатам исследований, сделан вывод о целесообразности применения полученных уравнений для прогнозирования срока годности масел, выделенных прессованием и хранящихся в темных условиях, на основе профиля жирных кислот.

7. Выводы

При необходимости длительного хранения мороженого и замороженных десертов следует контролировать состояние и дисперсность кристаллов льда и воздушной фазы, наличие продуктов первичного и вторичного окисления. Принимая во внимание, что оценка сроков годности мороженого требует длительного времени, исследователи считают важной задачей разработку прогнозных методов их установления, а также достоверных методов исследования показателей качества, определяющих хранимоспособность готового продукта. Для исследования структуры мороженого целесообразно применять методы неразрушающего контроля, в частности рамановскую спектроскопию, синхротронную рентгеновскую томографию и криосканирующую электронную микроскопию. Особенно важно использование методов неразрушающего контроля для изучения состояния воздушной фазы, характеризуемой наибольшей изменчивостью в процессе хранения. Получение достоверных знаний о состоянии воздушной фазы позволит развить теоретические аспекты взаимовлияния ледяной и воздушной фаз в мороженом. Важным фактором сохранения показателей качества мороженого является создание условий его хранения с достижением эффекта стеклования. Требуют совершенствования методы исследования окислительных процессов при хранении мороженого, в частности прогнозные методы устойчивости к окислению жира. Необходимо создание банка данных по жирнокислотному составу мороженого различного периода хранения в связи с появившимися данными по изменению содержания жирных кислот (масляной, олеиновой и линолевой) в процессе хранения.

[2] «Масла растительные и жиры животные. Определение методом газовой хроматографии массовой доли метиловых эфиров жирных кислот». М.: Стандартинформ, 2019. — 8 с.

[3] ГОСТ 34815-2021 «Продукты пищевые. Ускоренный тест на окисление с использованием окислительного испытательного реактора». М.: Российский институт стандартизации, 2022. — 12 с.

[4] ГОСТ 31758-2012 (ISO 6886:2006) «Жиры и масла животные и растительные. Определение устойчивости к окислению (ускоренное испытание на окисление)». М.: Стандартинформ, 2019. — 12 с.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / REFERENCES

1. Goff, H. D. Hartel, R.W., Rankin, S.A. (2025). Ice Cream. Springer Cham, 2025. https://doi.org/10.1007/978-3-031-77872-8
2. Творогова, А. А. (2021). Мороженое в России и СССР: Теория. Практика. Развитие технологий. СПБ.: ИД «Профессия», 2021. [Tvorogova, A. A, (2021). Ice cream in Russia and the USSR: Theory. Practice. Development of technologies. St. Petersburg: Publishing house "Profession", 2021. (In Russian)]
3. IIR (2006). Recommendations for the Processing and Handling of Frozen Foods. International Institute of Refrigeration. Paris, France: IIR, 2006.
4. Steele, R. (2004). Understanding and Measuring the Shelf-Life of Food. Woodhead Publishing, 2004.
5. McKenna, B. M. (2003). Texture in Food: Volume 1: Semi-Solid Foods. CRC Press, 2003.
6. Sitnikova, P. B., Tvorogova, A. A. (2019). Physical changes in the structure of ice cream and frozen fruit desserts during storage. *Food Systems*, 2(2), 31–35. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2019-2-2-31-35
7. Tvorogova, A. A., Kazakova, N. V., Shobanova, T. V., Belozerov, G. A. (August 24–30, 2019). *Control of the process of structure formation of "premium" class ice cream using monostabilizers*. 25th IIR international congress of refrigeration "Refrigeration science and technology", Montreal, Quebec, Canada, 2019.
8. Park, J.-M., Koh, J.-H., Kim, J.-M. (2018). Predicting shelf-life of ice cream by accelerated conditions. *Korean Journal for Food Science of Animal Resources*, 38(6), 1216–1225. https://doi.org/10.5851/kosfa.2018.e55
9. Buyck, J. R., Baer, R. J., Choi, J. (2011). Effect of storage temperature on quality of light and full-fat ice cream. *Journal of Dairy Science*, 94(5), 2213–2219. https://doi.org/10.3168/jds.2010-3897

10. Ситникова, П. Б., Творогова, А. А. (2019). Практическое применение эффекта стеклования при хранении замороженных сахаросодержащих продуктов: аналитический обзор. *Холодильная техника*, 108(2), 41–46. [Sitnikova, P. B., Tvorogova, A. A. (2019). Practical use of the effect of glass transition during storage of frozen sugar-containing products: An analytical review. *Refrigeration Technology*, 108(2), 41–46. (In Russian)]
11. Roos, Y. H. (2021). Glass transition and re-crystallization phenomena of frozen materials and their effect on frozen food quality. *Foods,* 10(2), Article 447. https://doi.org/10.3390/foods10020447
12. Mahato, S. Z., Zhu, Z., Sun, D.-W. (2019). Glass transitions as affected by food compositions and by conventional and novel freezing technologies: A review. *Trends in Food Science and Technology*, 94, 1–11. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.09.010
13. Muzammil, H. S., Junaid, M., Sameen, A., Syed, Q. A., Shukat, R., Aadil, R. M. (2022). Assessment of oligofructose and glycerol supplementation on glass transition temperature and quality of frozen yogurt. *Journal of Food Processing and Preservation*, 46(11), Article e16747. https://doi.org/10.1111/jfpp.16947
14. Zhao, J.-H., Kumar, P. K., Sablani, S. S. (2022). Glass transitions in frozen systems as influenced by molecular weight of food components. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 21(6), 4683–4715. https://doi.org/10.1111/1541-4337.13034
15. Zhang, W., Ma, J., Sun, D.-W. (2021). Raman spectroscopic techniques for detecting structure and quality of frozen foods: Principles and applications. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 61(16), 2623–2639. https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1828814
16. Юрова, Е. Ю., Кобзева, Т. В., Фильчакова, С. А. (2021). Особенности разработки экспресс-методов определения сроков годности функциональных продуктов на молочной основе длительного хранения. *Пищевая промышленность*, 3, 36–39. [Yurova, E. Yu., Kobzeva, T. V., Filchakova, S. A. (2021). The peculiarity of the development of express methods for determining the shelf life of functional milk-based products for long-term storage. *Food Industry*, 3, 36–39. (In Russian)] https://doi.org/10.24412/0235-2486-2021-3-0026
17. Mullin, J. W. (1993). Crystallization. Oxford: Butterworth-Heinemann.
18. Белозеров, Г. А., Творогова, А. А., Корешков, В. Н., Стефановский, В. М., Хохлова, Л. М., Гаврилычев, В. С. (2016). Влияние цикличных колебаний температуры на дисперсность кристаллов льда в мороженом при хранении. *Холодильная техника*, 105(5), 46–49. [Belozerov, G. A., Tvorogova, A. A., Koreshkov, V. N., Stefanovsky, V. M., Khokhlova, L. M., Gavrilychev, V. S. (2016). An effect of cyclic temperature fluctuations on dispersion of ice crystals in ice cream during storage. *Refrigeration Technology*, 105(5), 46–49. (In Russian)] https://doi.org/10.17816/RF99101
19. Mo, J., Groot, R. D., McCartney, G., Guo, E., Bent, J., van Dalen, G. et al (2019). Ice crystal coarsening in ice cream during cooling: A comparison of theory and experiment. *Crystals,* 9(6), Article 321. https://doi.org/10.3390/cryst9060321
20. Pinzer, B. R., Medebach, A., Limbach H. J., Dubois, C., Stampanoni, M., Schneebeli, M. (2012). 3D-characterization of three-phase systems using X-ray tomography: Tracking the microstructural evolution in ice cream. *Soft Matter*, 8(17), 4584–4594. https://doi.org/10.1039/C29M0034B
21. Sharqawy, M. H., Goff, H. D. (2022). Effect of temperature variation on ice cream recrystallization during freezer defrost cycles. *Journal of Food Engineering*, 335, Article 111188. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2022.111188
22. Mo, J., Guo, E., McCartney, D. G., Eastwood, D. S., Bent, J., Van Dalen, G. et al (2018). Time-resolved tomographic quantification of the microstructural evolution of ice cream. *Materials*, 11(10), Article 2031. https://doi.org/10.3390/ma11102031
23. Jia, G., Chen, Y., Sun, A., Orlien, V. (2016). Control of ice crystal nucleation and growth during the food freezing process. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 21(3), 2433–2454. https://doi.org/10.1111/1541-4337.12950
24. Giudici, P., Baiano, A., Chiari, P., De Vero, L., Ghanbarzadeh, B., Falcone, P. M. (2021). Modeling of freezing process in the batch production of ice. *Foods,* 10(2), Article 334. https://doi.org/10.3390/foods10020334
25. Bahram-Parvar, M. (2015). A review of modern instrumental techniques for measurements of ice cream characteristics. *Food Chemistry*, 188, 625–631. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.05.017
26. Rockett, P. Karagadde, S., Guo, E., Bent. J., Hazekamp, J., Kingsley, M. et al. (June 21–26, 2015). *A 4-D dataset for validation of crystal growth in a complex three-phase material, ice cream.* IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, MCWASP XIV: International Conference on Modelling of Casting, Welding and Advanced Solidification Processes. Awaji island, Hyogo, Japan, 2015. https://doi.org /10.1088/1757-899X/84/1/012076
27. Guo, E., Zeng, G., Kazantsev, D., Rockett, P., Bent, J., Kirkland, M. et al. (2017). Synchrotron X-ray tomographic quantification of microstructural evolution in ice cream — a multi-phase soft solid. *RSC Advances*, 7(25), 15561–15573. https://doi.org/10.1039/C7RA00642J
28. Masselot, V., Bosc, V., Benkhelifa, H. (2021). Analyzing the microstructure of a fresh sorbet with X-ray micro-computed tomography: Sampling, acquisition, and image processing**.** *Journal of Food Engineering,* 292, Article 110347. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.110347
29. Olakanmia, S., Karunakaran, C., Jayas, D. (2022). Applications of X-ray microcomputed tomography and small-angle X-ray scattering techniques in food systems: A concise review. *Journal of Food Engineering*, 342, Article 111355. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2022.111355
30. Chang, Y. Hartel, R. W. (2002). Stability of air cells in ice cream during hardening and storage. *Journal of Food Engineering*, 55(1), 59–70. https://doi.org/10.1016/s0260-8774(01)00242-4
31. Chang, Y. Hartel, R. W. (2002). Measurement of air cell distributions in dairy foams. *International Dairy Journal*, 12(5), 463–472. https://doi.org/10.1016/S0958-6946(01)00171-6
32. Chang, Y. Hartel, R. W. (2002). Development of air cells in a batch ice cream freezer. *Journal of Food Engineering*, 55(1), 71–78. https://doi.org/10.1016/S0260-8774(01)00243-6
33. Parra, O. D. H., Ndoye, F.-T., Benkhelifa, H., Flick, D., Alvarez, G. (2018). Effect of process parameters on ice crystals and air bubbles size distributions of sorbets in a scraped surface heat exchanger. *International Journal of Refrigeration*, 92, 225–234. https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2018.02.013
34. Masuda, H., Sawano, M., Iyota, H., Shimoyamada, M. (2023). Kinetics of size change in air bubble and fat globule during ice cream freezing process. *Journal of Food Process Engineering*, 46, Article e14420. https://doi.org/10.1111/jfpe.14420
35. Eisner, M., Wildmoser, H., Windhab, E. J. (2005). Air cell microstructuring in a high viscous ice cream matrix. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 263(1–3), 390–399. https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2004.12.017
36. VanWees, S. R., Rankin, S. A., Hartel, R. W. (2022). Shrinkage in frozen desserts. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 21(1), 780–808. https://doi.org/10.1111/1541-4337.12888
37. VanWees, S. R., Rankin, S. A., Hartel, R.W. (2020). The microstructural, melting, rheological, and sensorial properties of high-overrun frozen desserts. *Texture Studies*, 51(1), 92–100. https://doi.org/10.1111/jtxs.12461
38. Sofjan, R. P., Hartel, R. W. (2004). Effects of overrun on structural and physical characteristics of ice cream. *International Dairy Journal,* 14(3), 255–262. https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2003.08.005
39. Hu, M., Jacobsen, C. (2016). Oxidative Stability and Shelf Life of Foods Containing Oils and Fats. Elsevier, 2016.
40. Tiryaki-Sönmez, G., Schoenfeld, B., Vatansever-Ozen, S. (2011). Omega-3 fatty acids and exercise: A review of their combined effects on body composition and physical performance. *Biomedical Human Kinetics*, 3, 23–29. https://doi.org/10.2478/v10101-011-0007-4
41. Gowda, A., Sharma, V., Goyal, A., Singh, A. K., Arora, S. (2018). Process optimization and oxidative stability of omega-3 ice cream fortified with flaxseed oil microcapsules. *Journal of Food Science and Technology*, 55(5), 1705–1715. https://doi.org/10.1007/s13197-018-3083-4
42. Lim, C. W., Norziah, M. H., Lu, H. F. (2010). Effect of flaxseed oil towards physicochemical and sensory characteristic of reduced fat ice creams and its stability in ice creams upon storage. *International Food Research Journal,* 17, 393–403.
43. Aladwani, Y., Badawi, S. K. (2018). Effect of using flaxseed oil source of omega-3 acids as a partial replacement for milk fat in the chemical and physical properties in ice cream. *Mesopotamia Journal of Agriculture*, 46(1), 213–224. https://doi.org/10.33899/magrj/ 2018/161432
44. Ullah, R., Nadeem, M., Imran, M. (2017). Omega-3 fatty acids and oxidative stability of ice cream supplemented with olein fraction of chia (*Salvia hispanica* L.) oil. *Lipids in Health and Disease,* 16(1), Article 34. https://doi.org/10.1186/S12944-017-420-y
45. Shaviklo, A. R., Seyed-Nejad, S. R., Mahdavi Adeli, H. R. (2020). Determination of optimum level of omega 3 fish oil plus vitamin E and their effects on oxidative and sensory shelf stability in a traditional Persian ice cream formulation using a computer-aided statistical programme. *Iranian Journal of Fisheries Sciences*, 19(1), 151–166. https://doi.org/10.22092/IJFS/2019/119720
46. Nadeem, M., Ullah, R., Ullah, A. (2016). Improvement of the physical and oxidative stability characteristics of ice cream through interesterified moringa oleifera oil. *Pakistan Journal of Scientific and Industrial Research Series B: Biological Sciences*, 59(1), 38–43. https://doi.org/10.52763/PJSIR.BIOL.SCI.59.1.2016.38.43
47. Kaur, D., Wani, A. A., Singh, D. P., Sogi, D. (2011). Shelf life enhancement of butter, ice-cream, and mayonnaise by addition of lycopene. *International Journal of Food Properties,* 14(6), 1217–1231. https://doi.org/10.1080/10942911003637335
48. Ullah, R., Nadeem, M., Ayaz, M., Tayyab, M., Imran, M., Sajid, R. (2015). Antioxidant characteristics of ice cream supplemented with sugarcane (*Saccharum officinarum* L.) juice. *Food Science and Biotechnology,* 24(4), 1227–1232. https://doi.org/10.1007/s10068-015-0157-1
49. Khaled, M. A., Ashoush, I. S., El Batawy, O. (2013). Comparative evaluation of three essential oils as functional antioxidants and natural flavoring agents in ice cream. *World Applied Sciences Journal*, 23(2), 159–166. https://doi.org/10.5829/idosi.wasj.2013
50. Frankel, E. N., Meyer, A. S. (2000). The problems of using one-dimensional methods to evaluate multifunctional food and biological antioxidants. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 80(13), 1925–1941. https://doi.org/10.1002/1097-0010(200010)80:13<1925:: aid-jsfa714>3.0.co;2-4
51. Li, Y., Si, D., Sabier, M., Liu, J., Si, J., Zhang, X. (2023). Guideline for screening antioxidant against lipid-peroxidation by spectrophotomete. *Efood,* 4(2), Article e80. https://doi.org/10.1002/efd2.80
52. Abeyrathne, E. D. N. S., Nam, K., Ahn, D. U. (2021). Analytical methods for lipid oxidation and antioxidant capacity in food systems. *Antioxidants,* 10(10), Article 1587. https://doi.org/10.3390/antiox10101587
53. Sadighara, P., Shahbazi, R., Zirak, M. R., Mohamadi, S., Karami, L., Zomorodian, N. et al. (2022). The content and dietary exposure of Malondialdehyde in industrial and traditional ice cream fats. *Journal of Food Safety and Hygiene*, 8(1), 25–31. https://doi.org/10.18502/jfsh.v8i1.9958
54. Okafor, P. N., Nwosu, O., Chukwu, J., Agbayi, J., Maduagwu, E. N. (2007). Occurrence of malondialdehyde and N-nitrosamines and their precursors in some Nigerian ice creams, yogurts, meat and fish species. *African Journal of Biochemistry Research*, 1, 1–5. https://doi.org/10.5897/AJBR.9000177
55. Papastergiadis, A., Mubiru**,** E., Van Langenhove H., De Meulenaer, B. (2012). Meulenaer malondialdehyde measurement in oxidized foods: Evaluation of the spectrophotometric thiobarbituric acid reactive substances (TBARS) test in various foods. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 60(38), 9589–9594. https://doi.org/10.1021/jf302451c
56. Chen, J., Cai, D., Zhang, Y. (2016). Rapid determination of lipid peroxidation using a novel pyridoxamine-participating ferrous oxidation-sulfosalicylic acid spectrophotometric method. *Food Chemistry,* 211, 637–644. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.05.106
57. Gonzalez, S., Duncan, S. E., O'Keefe, S. F., Sumner, S. S., Herbein, J. H. (2003). Oxidation and textural characteristics of butter and ice cream with modified fatty acid profiles. *Journal of Dairy Science,* 86(1), 70–77. https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(03)73585-1

58. Shiota, M., Ikeda, N., Konishi, H., Yoshioka, T. (2006). Photooxidative stability of ice cream prepared from milk fat. *Food Science*, 67(3), 1200–1207. https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2002.tb09477.x
59. Khan, I. T., Nadeem, M., Ullah, R., Imran, M. (2022). Triglyceride, fatty acid profile, antioxidant characteristics, vitamins, lipid oxidation and induction period of ice cream produced from cow and Buffalo Milk. *Journal of Food Processing and Preservation*, 46(1), Article 17278. https://doi.org/10.1111/jfpp.17278
60. Nadeem, M., Situ, C., Abdullah, M. (2015). Effect of olein fractions of milk fat on oxidative stability of ice cream. *International Journal of Food Properties,* 18(4), 735–745. https://doi.org/10.1080/10942912.2013.814666
61. Mannion, D., Furey, A., Kieran, N., Kilcawley, K. N. (2018). Development and validation of a novel free fatty acid butyl ester gas chromatography method for the determination of free fatty acids in dairy products. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 67(1), 499–506. https://doi.org/10.1021/acs.jafc.8b05462
62. Жижин, Н. А. (2020). Применение метода «быстрой» газовой хроматографии для регулярного анализа жирных кислот в молоке и молочных продуктах. *Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий*, 82(1), 164–168. [Zhizhin, N. A. (2020). Application of the "fast" gas chromatography method for routine analysis of fatty acids in milk and dairy products. *Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies*, 82(1), 164–168. (In Russian)] https://doi.org/10.20914/2310-1202-2020-1-164-168
63. Palanuwech, J., Potineni, R., Roberts, R. F., Coupland, J. N. (2003). A method to determine free fat in emulsions. *Food Hydrocolloids,* 17(1), 55–62. https://doi.org/10.1016/S0268-005X(02)00035-8
64. Tsao, C.-H., Chang, C.-W., Ho, Y.-C., Chuang, Y.-K., Lee, W.-J. (2021). Application of OXITEST for prediction of shelf-lives of selected cold-pressed oils. *Frontiers in Nutrition,* 8, Article 763524. https://doi.org/10.3389/fnut.2021.763524
65. Гурьева К. Б., Солдатова С. Ю. (2023). Исследования периода индукции мясных консервов на приборе OXITEST. *Бюллетень науки и практики*, 9(9), 205–211. [Guryeva K. B., Soldatova S. Yu. (2023). Research of the induction period of canned meat on the OXITEST device. *Bulletin of Science and Practice*, 9(9), 205–211. (In Russian)] https://doi.org/10.33619/2414-2948/94/22

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ	AUTHOR INFORMATION
Принадлежность к организации	**Affiliation**
Творогова Антонина Анатольевна — доктор технических наук, доцент, заместитель директора, Всероссийский научно-исследовательский институт холодильной промышленности 127422, Москва, ул. Костякова,12 E-mail: a.tvorogova@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7293-9162 * автор для контактов	**Antonina A. Tvorogova**, Doctor of Technical Sciences, Docent, Deputy Director, All-Russian Scientific Research Institute of Refrigeration Industry 12, Kostykov str., Moscow, 127422, Russia E-mail: a.tvorogova@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7293-9162 * corresponding author
Казакова Наталия Владимировна — кандидат технических наук, ведущий инженер, лаборатория технологии мороженого, Всероссийский научно-исследовательский институт холодильной промышленности 127422, Москва, ул. Костякова, 12 E-mail: n.kazakova@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2963-6294	**Natalia V. Kazakova**, Candidate of Technical Sciences, Lead Engineer, Laboratory of Ice Cream Technology, All-Russian Scientific Research Institute of Refrigeration Industry 12, Kostyakova str., 127422, Moscow, Russia E-mail: n.kazakova@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2963-6294
Ландиховская Анна Валентиновна — кандидат технических наук, научный сотрудник, лаборатория технологии мороженого, Всероссийский научно-исследовательский институт холодильной промышленности 127422, Москва, ул. Костякова, 12 E-mail: a.landihovskaya@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5881-2309	**Anna V. Landikhovskaya**, Candidate of technical sciences, Researcher, Laboratory of Ice Cream Technology, All-Russian Scientific Research Institute of Refrigeration Industry 12, Kostykov str., Moscow, 127422, Russia E-mail: a.landihovskaya@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5881-2309
Ситникова Полина Борисовна — кандидат технических наук, научный сотрудник, лаборатория технологии мороженого, Всероссийский научно-исследовательский институт холодильной промышленности 127422, Москва, ул. Костякова, 12 E-mail: p.sitnikova@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4098-9146	**Polina B. Sitnikova**, Candidate of Technical Sciences, Researcher, Laboratory of Ice Cream Technology, All-Russian Scientific Research Institute of Refrigeration Industry 12, Kostyakova str., 127422, Moscow, Russia E-mail: p.sitnikova@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4098-9146
Ермоченков Дмитрий Максимович — инженер, лаборатория технологии мороженого, Всероссийский научно-исследовательский институт холодильной промышленности 127422, Москва, ул. Костякова,12 E-mail: d.ermochenkov@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0009-0005-2668-3123	**Dmitriy M. Ermochenkov**, Engineer, Laboratory of Ice Cream Technology, All-Russian Scientific Research Institute of Refrigeration Industry 12, Kostykova str., Moscow, 127422, Russia E-mail: d.ermochenkov@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0009-0005-2668-3123
Ананьева Наталья Валентиновна — кандидат технических наук, инженер, отдел научно-технической информации, Всероссийский научно-исследовательский институт холодильной промышленности 127422, Москва, ул. Костякова, 12 E-mail: moloprom@mail.ru ORCID: http://orcid.org/0000-0001-6113-9207	**Natalia V. Ananyeva**, Candidate of Technical Sciences, Engineer, Department of Scientific and Technical Information, All-Russian Scientific Research Institute of Refrigeration Industry 12, Kostykov str., Moscow, 127422, Russia E-mail: moloprom@mail.ru ORCID: http://orcid.org/0000-0001-6113-9207
Критерии авторства	**Contribution**
Авторы в равных долях имеют отношение к написанию рукописи и одинаково несут ответственность за плагиат.	Authors equally relevant to the writing of the manuscript, and equally responsible for plagiarism.
Конфликт интересов	**Conflict of interest**
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.	The authors declare no conflict of interest

DOI: https://doi.org/10.21323/2618-9771-2026-9-2-181-191

Поступила 30.01.2026
Поступила после рецензирования 22.04.2026
Принята в печать 24.04.2026
© Ульрих Е. В., 2026

https://www.fsjour.com/jour
Научная статья
Открытый доступ

ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА ВЫДЕЛЕНИЯ ФРАКЦИИ СКВАЛЕНА ИЗ ЛЮПИНА БЕЛОГО

Ульрих Е. В.

Калининградский государственный технический университет, Калининград, Россия

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:
люпин белый, экстракция, сквален, липидная фракция, хроматография, спектроскопия, сердечно-сосудистые заболевания

АННОТАЦИЯ

Сквален представляет собой полиненасыщенный углеводородный тритерпен ($C_{30}H_{50}$), обладающий массой полезных свойств. Извлечение сквалена из дикорастущего люпина белого на сегодняшний день является экономически целесообразным и актуальным направлением в пищевой и фармакологической промышленности. Цель данного исследования — изучение процесса выделения фракции сквалена из люпина белого. Для исследований использовались липидная фракция образцов люпина, полученная методом экстракции по Сокслету. Определение содержания биологически активных веществ в исследуемом образце и поиск сквалена проводили с помощью метода газовой хроматографии. Визуализацию сквалена и сопутствующих веществ осуществляли с помощью химической детекции (окрашивание йодными парами). Установлено, что количество липидной фракции, выделенной из люпина белого, составляло 9,65±0,32 %. Показано, что липидная фракция люпина белого содержит до 34,57 % сквалена, кампестерола — 10,24 %. Выявлено, что в исследуемом образце содержится 2-метилоктакозан (содержание относительно других компонентов 9,62 %), хенейкозан (содержание относительно других компонентов 8,33 %) и бета-ситостерол (содержание относительно других компонентов 8,99 %). Отмечено, что при экстракции в липидную фракцию перешел также люпеол (тритерпеноид). Используя метод ВЭЖХ, удалось получить фракцию, содержащую чистый сквален. Установлено, что из липидной фракции люпина может быть выделен сквален при применении смеси, состоящей из 95 % этанола и 50 % КОН. Процесс включает многостадийную экстракцию системой гексан–вода, обработку полученной фазы сульфатом натрия и последующую очистку методом жидкостной хроматографии, что позволяет достичь степени чистоты 98 %. Предполагается, что выделенный из люпина белого сквален может использоваться для изготовления пищевых добавок и функциональных продуктов питания для профилактики сердечно-сосудистых заболеваний человека.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 25-26-20129, https://rscf.ru/project/25-26-20129/ «Разработка биологически активных добавок на основе сквалена для профилактики сердечно-сосудистых заболеваний моряков транспортного флота Калининградской области»).

Received 30.01.2026
Accepted in revised 22.04.2026
Accepted for publication 24.04.2026
© Ulrikh E. V., 2026

Available online at https://www.fsjour.com/jour
Original scientific article
Open access

STUDY OF THE PROCESS OF ISOLATION OF THE SQUALENE FRACTION FROM WHITE LUPINE

Elena V. Ulrikh

Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia

KEYWORDS:
white lupine, extraction, squalene, lipid fraction, chromatography, spectroscopy, cardiovascular diseases

ABSTRACT

Squalene is a polyunsaturated hydrocarbon triterpene ($C_{30}H_{50}$) with numerous beneficial properties. Extracting squalene from wild white lupine is currently economically feasible and a promising area for the food and pharmaceutical industries. The aim of this study was to investigate the process of isolating a squalene fraction from white lupine. The lipid fraction of lupine samples obtained by Soxhlet extraction was used for the research. Gas chromatography was used to determine the content of biologically active substances in the test sample and to detect squalene. Squalene and related substances were visualized using chemical detection (iodine vapor staining). The amount of lipid fraction isolated from white lupine was found to be 9.65±0.32 %. The lipid fraction of white lupine was shown to contain up to 34.57 % squalene and 10.24 % campesterol. The test sample was found to contain 2-methyloctacosane (9.62 % relative to other components), heneicosane (8.33 % relative to other components), and beta-sitosterol (8.99 % relative to other components). Lupeol (a triterpenoid) was also noted to be present in the lipid fraction during extraction. Using HPLC, a fraction containing pure squalene was obtained. It has been established that squalene can be isolated from the lipid fraction of lupine using a mixture of 95 % ethanol and 50 % KOH. The process involves multi-stage extraction with the hexane-water system, treatment of the resulting phase with sodium sulfate, and subsequent purification by liquid chromatography, achieving a purity of 98 %. It is believed that squalene isolated from white lupine can be used to manufacture dietary supplements and functional foods for the prevention of human cardiovascular diseases.

FUNDING: The study was supported by a grant from the Russian Science Foundation (project No. 25-26-20129, https://rscf.ru/project/25-26-20129/ “Development of biologically active additives based on squalene for the prevention of cardiovascular diseases in sailors of the transport fleet of the Kaliningrad Region”).

1. Введение

Сквален — полиненасыщенный углеводород, относящийся к тритерпенам (C30H50) и обладающий широким спектром полезных свойств. В очищенном состоянии он представляет собой бесцветную прозрачную жидкость без выраженного вкуса и запаха [1]. Название вещества происходит от латинского «squalus», что означает «акула», так как печень этого морского животного содержит значительное количество сквалена. Особенно богата данным соединением печень глубоководных черных акул, которая состоит на 75 % из липидов. Помимо печени акулы сквален присутствует в оливковом

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: **Ульрих, Е. В.** (2026). Изучение процесса выделения фракции сквалена из люпина белого. *Пищевые системы*, 9(2), 181–191. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2026-9-2-181-191

FOR CITATION: **Ulrikh, E. V.** (2026). Study of the process of isolation of the squalene fraction from white lupine. *Food Systems,* 9(2), 181–191. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2026-9-2-181-191

и амарантовом маслах, а также в меньшей степени содержится в кукурузном масле и рисовых отрубях [2].

Растительные компоненты являются источником пищевых и биологически активных веществ. Как правило, они содержат в себе белки, липиды, пигменты, витамины. В частности, растительные масла, помимо триацилглицерина, включают также вторичные метаболиты, такие как стерины, токоферолы, полифенолы и сквален [3–5]. Несмотря на их незначительное содержание, они играют важную роль в физиологии человека [3]. Поэтому источником сквалена могут служит как масличные растения и их масла, так и различные злаковые и травяные культуры (Таблица 1). Сквален растительного происхождения имеет значительные преимущества перед скваленом животного происхождения. В частности, он не токсичен, более стабилен, не имеет цвета и запаха [6].

Отмечено, что гексановый экстракт листьев зеленого чая (*Camellia sinensis*) содержал сквален в количестве 29,2 г/кг экстракта [7].

Таблица 1. **Содержание сквалена в растительном сырье**
Table 1. **Squalene content in the plant raw material**

Растительный источник сквалена	Количество	Литература
Растительное масло амаранта	6300 мг/100 г	[8,9]
Оливковое масло	685,5 мг/100 г	[8,9]
Кукуруза	27,9–594 мг/100 г	[8,9,10]
Соевое масло	9,9 мг/100 г	[10]
Арахис	27,4 мг/100 г	[10]
Семена тыквы	89,0 мг/100 г	[11]
Пальмовое масло	250–540 мг/л	[12]
Листья зеленого чая	3682 мг/100 г	[13]
Рис	14,1 мг/100 г	[10]
Зародыши пшеницы		
Масло виноградных косточек		

Как видно из Таблицы 1, наибольшее содержание сквалена отмечено в растительном масле амаранта и в кукурузе, однако с коммерческой точки зрения его преимущественно получают из оливок и оливкового масла [10]. При этом следует отметить, что содержание сквалена в оливковом масле первого отжима составляет 491,0 ± 15,55 мг/100 г, а в рафинированном оливковом масле — 290,0 ± 9,89 мг/100 г [14,15]. Таким образом, можно сделать вывод, что процесс рафинации способствует удалению из растительных масел исследуемого вещества (сквалена) [4,15] и накоплению его в дистилляте растительных масел [16]. Поэтому дистилляты растительных масел можно использовать в качестве полноценного источника сквалена [12,14]. Так, например, в дистилляте пальмового масла содержание сквалена составляет 2400–13500 мг/л, что значительно выше, чем в пальмовом масле (от 250 до 540 мг/л) [12]. В работе Ченг и др. говорится о том, что пальмовое масло первого отжима содержит сквален в количестве 961,77 мг/100 г [16]. Поэтому так же, как и оливковое масло, пальмовое масло можно считать потенциальным источником сквалена. Однако выделение сквалена из растительных масел экономически невыгодно [15]. Содержание сквалена в дезодорированном дистилляте оливкового масла составляет от 3000 до 9970 мг/100 г, что примерно в 50–125 раз больше, чем в оливковом масле. Аналогичное явление наблюдалось для соевого масла, масла рисовых отрубей, подсолнечного масла, пальмового масла и рапсового масла. Это указывает на ценность производства сквалена из дезодорированного дистиллята, который может быть использован в качестве выгодного ресурса для повышения ценности промышленных отходов и побочных продуктов [14].

Также обращаем внимание читателя на то, что сквален разрушается в процессе термической обработки растительных масел, поэтому некоторые ученые исследовали содержание сквалена в термически обработанных маслах. Так, Kalogeropoulos с соавтором установлено, что во фритюрных (термически обработанных) растительных маслах концентрация сквалена снижалась до значения 5,9 мг/100 г жира [17]. Авторы отметили, что в оливковом масле сквален не распадается в процессе кулинарной обработки [17]. Именно поэтому можно считать оливковое масло лучшим источником сквалена, даже несмотря на то, что в процессе рафинации оливкового масла немного снижается содержание сквалена [15].

Сквален участвует в биосинтезе холестерина, однако лишь около 10% поступающего в организм соединения трансформируется в этот компонент. Являясь составляющей липидного слоя человека (до 12–14%), сквален легко усваивается и может использоваться клетками для различных физиологических процессов [18]. Синтез сквалена в организме происходит через сложные биохимические реакции, которые также способствуют формированию таких важнейших веществ, как коэнзим Q10 и тиреоидные гормоны. Нарушения этих процессов могут привести к метаболическим сбоям, связанным с рисками развития атеросклероза, сердечно-сосудистых заболеваний и инсульта [19].

Анаэробное дыхание характерно как для одноклеточных организмов (например, бактерий), так и для высших организмов в экстремальных условиях. В растительных системах данный механизм проявляется в условиях сниженного доступа кислорода, особенно при переувлажнении почвы. Исследования показали, что удобрения на основе нитратов способны повысить устойчивость растений к гипоксии [20]. Сложные процессы анаэробного дыхания представляют значительный интерес для науки благодаря своей универсальности и приспособительной роли в условиях недостаточного доступа кислорода [20]. Несмотря на это, многие аспекты участия сквалена в подобных реакциях продолжают оставаться предметом изучения.

Анаэробное дыхание чаще наблюдается у бактерий, где фумарат может выступать акцептором электронов [21]. Восстановительные процессы с участием фумарата обходят определенные этапы дыхательной цепи, формируя ионный градиент на мембране, который стимулирует энергетическое фосфорилирование. В качестве электронных доноров при этом процессе могут быть задействованы как органические, так и неорганические соединения. Интересно, что в современных исследованиях предполагается способность сквалена — ключевого компонента метаболизма животных и человека — играть роль электронного донора в анаэробных условиях. Как ненасыщенное соединение, подобно фумарату, сквален может восстанавливаться, образуя насыщенные производные. Такой процесс сопровождается восстановлением переносчиков электронов и ионов [21]. Подобное эндогенное анаэробное окисление включает реакцию гидрирования двойных связей, например, в жирных кислотах мембранных фосфолипидов.

Предполагается, что сквален был частью древних биохимических систем, существовавших на Земле более трех миллиардов лет назад. В те времена высокие температуры и состав земной атмосферы (метан и азот) создавали экстремальные условия. Археи и цианобактерии, появившиеся тогда, адаптировались к температурам до 100 °C и низким уровням кислорода благодаря наличию ациклических изопреноидов в их мембранах, что защищало их от окислительного стресса. Считается, что сквален как тритерпеновое соединение являлся ключевым субстратом анаэробных процессов [22].

Масло семян люпина белого является богатым источником сквалена и содержит до 8% от массы масла. Это делает его достойной заменой для производства сквалена вместо использования печени акулы [23]. Важно исследовать влияние сквалена на адаптационные механизмы при риске развития сердечно-сосудистых заболеваний у человека.

Целью данного исследования является изучение процесса выделения фракции сквалена из люпина белого.

2. Материалы и методы

2.1. Объекты исследования

Опытные образцы бобов люпина белого собирали исполнители проекта в августе 2025 года в Гурьевском районе Калининградской области (54°46′00″ с.ш. и 20°36′00″ в.д.) в период спелости семян. Образцы доставлялись в лабораторию в стручках. После доставки в лабораторию стручки шелушили, из бобов удаляли крупные посторонние примеси, а также поврежденные вредителями и подгнившие экземпляры. Основные примеси были представлены щепками, кусочками земли, камнями, примесями других культур и поврежденными вредителями бобами. Далее бобы люпина промывали водопроводной водой для удаления песка и оставшихся мелких примесей. Внешний вид свежесобранных в Калининградской области и вымытых бобов представлен на Рисунке 1.

Чистые бобы сушили на открытом воздухе и досушивали при температуре 40 °C в сушильном шкафу с конвекцией. Высушенные бобы хранились в бумажных пакетах в сухом и хорошо проветриваемом помещении. Непосредственно перед анализом бобы люпина измельчали роторным лабораторным измельчителем Fritsch Pulverisette 14 (Fritsch GmbH, Германия).

Для подбора и оптимизации режимов выделения сквалена из липидной фракции образцов люпина, собранных исполнителями, липидная фракция была получена методом экстракции по Сокслету (см. п. 2.2). Внешний вид липидной фракции представлен на Рисунке 2.



Рисунок 1. **Внешний вид собранных и вымытых бобов люпина перед сушкой**
Figure 1. **Appearance of harvested and washed lupine beans before drying**

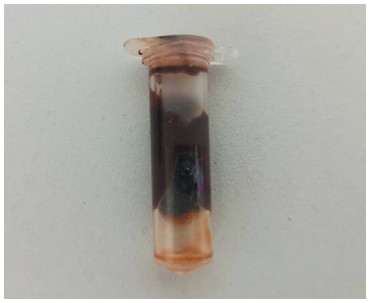


Рисунок 2. **Образец липидной фракции люпина для исследования**
Figure 2. **Sample of the lipid fraction of lupine for analysis**

Известно, что для получения липидной фракции, богатой скваленом, применяют классические методы экстракции растительных масел (экстракция растворителями).

2.2. Экстракция липидной фракции из бобов люпина

При анализе литературных данных было установлено, что липиды бобов люпина имеют различную полярность, что затрудняет процесс их полного извлечения [24,25]. Для выделения жиров использовался метод, включающий экстракцию с помощью установки Сокслета EV6 All/14 (Gerhardt GmbH & Co. KG, Германия). В общем виде проводилась следующая процедура экстракции: в колбу вливали 200 мл растворителя (диэтиловый эфир); включали нагрев в аппарате Сокслета; экстракцию проводили заданное время (многократная экстракция сырья парами растворителя). По прошествии заданного времени экстракцию приостанавливали, содержимое колбы направляли на отгонку с использованием ротационного испарителя RV 8 V–C (IKA-Werke GmbH & Co. KG, Германия). Остаток на стенках колбы представлял собой целевой продукт — экстрагированные жиры, которые взвешивались на весах FA1204E (Joanlab, Китай) и направлялись на анализ. Продолжительность экстракции составляла 2 ч, температура 60 °C. В липидной фракции содержится искомый сквален [26], на основе которого планируется разработать рецептуры биологически активных добавок к продуктам питания моряков транспортного флота Калининградской области для профилактики сердечно-сосудистых заболеваний.

2.3. Определение биологически активных веществ и сквалена в липидной фракции

Для изучения содержания биологически активных веществ в исследуемом образце и поиска сквалена применяли метод газовой хроматографии, описанный в работе [27], с некоторыми модификациями. Разделение проводили на колонке Zebron ZB-5MS 30 mL×0,25 mm ID×0,25 µm df. Жидкая фаза состояла из 5%- полисиларилен-95полидиметилсилоксан, температурные пределы: от минус 60 °C до 325/350 °C, газ-носитель — гелий с постоянным потоком — 1,0 мл/мин; анализ осуществлялся в изотермическом режиме, температура колонки — 250 °C; температура испарителя — 270 °C; температура ионного источника — 250 °C; температура интерфейса — 250 °C; напряжение на детекторе составляло 0,84 кВ; поток эмиссии — 60 µA; объем вводимой пробы — 5µl [24]. Метод реализовывали на газовом хроматомасс-спектрометре GCMS-QP2010 Ultra / GCMS-QP2010 SE (Shimadzu, Япония). Визуализацию сквалена и сопутствующих веществ проводили с помощью УФ-детекции при длине волны 254 нм. Сквален, как и другие ненасыщенные соединения, поглощает УФ-свет на пластине с индикатором F254 (Azura UVD 2.1S, одноканальный детектор, Icon Scientific Inc., США). Он проявляется в виде темных пятен на зеленом флюоресцирующем фоне. Идентификацию сквалена выполняли путем сравнения коэффициента подвижности (Rf) пятен образца и стандарта.

Тонкослойную хроматографию (ТСХ) выполняли на алюминиевых пластинах со слоем силикагеля; в качестве подвижной фазы использовали элюент, нанесение проб осуществляли вручную (ООО «Имид», Краснодар, Россия), визуализацию пятен проводили в УФ-свете (254/365 нм) с использованием детектора Azura UVD 2.1S (Icon Scientific Inc., США). Сначала готовили подвижную фазу, состоящую из смеси гексан и хлороформ в соотношении 4:1. Далее на пластину для хроматографирования Sorbfil (Россия) наносили разметку карандашом. С помощью микропипетки на стартовую линию наносили 5 мкл раствора образца и раствора стандарта сквалена (LabStandart, Италия). Затем пластину помещали в камеру для ТСХ, предварительно насыщенную парами растворителей. Камеру закрывали и проводили хроматографирование. Длительность процесса составляла 15–20 минут. За это время фронт растворителя поднимется примерно на 80% от высоты пластины. Визуализацию сквалена и сопутствующих веществ проводили с помощью химической детекции (окрашивание йодными парами). Для этого пластину помещали в предварительно насыщенную парами йода камеру на несколько минут. Сквален проявился в виде желто-коричневого пятна. При определении сквалена (после того как фронт растворителя достиг отметки примерно 5,0–5,5 см) пластину извлекали из камеры и оставляли под вытяжкой до удаления остатков подвижной фазы. Далее с помощью УФ-анализатора (Azura UVD 2.1S, одноканальный детектор, Icon Scientific Inc., США) проводили детекцию и отмечали проявившиеся следы сквалена. Степень фракционирования и чистоты также оценивали методом тонкослойной хроматографии (алюминиевая подложка со слоем силикагеля, подвижный элюент, ручное нанесение пробы, визуализация пятен в УФ-свете (254/365 нм), ООО «Имид», Краснодар, Россия).

Метод ВЭЖХ для очистки и концентрирования сквалена выполняли с использованием хроматографа LC-20AB Shimadzu Prominence (Япония), оснащенного бинарным насосом и диодно-матричным детектором SPD-M20A, а также колонкой C18 (4,6×250 мм), заполненной стационарной фазой Separon SGX C18 (5 мкм). Фракционирование липидной фракции и очистку сквалена проводили в изократических условиях в подвижной фазе «гексан — ацетонитрил» при расходе 1 мл/мин. Разделение проводили при температуре 40 °C в режиме градиентного элюирования [28].

2.4. Выделение сквалена из липидной фракции люпина белого

В основу методов получения (выделения) сквалена взяли исследования зарубежных и отечественных авторов [29–31]. В качестве экстрагента использовали гексан. Липидную фракцию, содержащую сквален, растворяли в смеси, состоящей из 95% этанола и 50% KOH (соотношение спирта к щелочи 6:1). Согласно исследованиям, концентрация KOH 50% является оптимальной для извлечения сквалена. Далее смесь кипятили с обратным холодильником «Веста» (300 мм, 29/32, SIMAX, Чехия) в течение 60 мин при температуре 60 °C при постоянном перемешивании. После реакционную смесь охлаждали до комнатной температуры. Далее полученную смесь переносили в делительную воронку и добавляли к смеси дистиллированную воду с гексаном в соотношении 1:1:2. После чего полученную смесь интенсивно встряхивали в течение 10–20 секунд и отстаивали до полного расслоения фаз (верхняя фаза — раствор сквалена в гексане; нижняя фаза — спиртовой раствор мыла и глицерина). Нижнюю фазу сливали отдельно, а затем снова подвергали экстракции в делительной воронке. Экстракцию проводили три раза, при каждом последующем экстрагировании количество добавляемого гексана к реакционной смеси уменьшали. Верхнюю фазу (раствор сквалена в гексане) после каждой экстракции сливали в объединенную пробу. Объединенный экстракт (пробу) промывали дистиллированной водой в объеме, равном объему органической фазы. Промывание проводили три раза до нейтральной реакции. Далее промытый раствор высушивали путем добавления к нему безводного сульфата натрия (Na_2SO_4) и фильтровали. На следующем этапе полученную фракцию направляли на очистку, которую проводили с помощью метода ВЭЖХ. Очистку выполняли с использованием хроматографа LC-20AB Shimadzu Prominence (Япония), оснащенного бинарным

насосом и диодно-матричным детектором SPD-M20A; разделение осуществляли на колонке C18 (4,6×250 мм), заполненной стационарной фазой Separon SGX C18 (5 мкм). Фракционирование липидной фракции и очистку сквалена проводили в изократических условиях в подвижной фазе «гексан — ацетонитрил» при расходе 1 мл/мин. Разделение проводили при температуре 40 °C в режиме градиентного элюирования.

Полный процесс получения и очистки сквалена представлен на Рисунке 3.

На заключительном этапе растворитель удаляли с помощью ротационного испарителя (Hei-VAP, Heidolph, Германия). Процесс выпаривания вели при температуре 40 °C.

Далее с целью идентификации и подтверждения чистоты сквалена проводили анализ полученного образца методами газовой хроматографии и ИК-Фурье спектрофотометрии.

Анализ сквалена методом газовой хроматографии проводили на газовом хромато-масс-спектрометре GCMS-QP2010 Ultra / GCMS-QP2010 SE (Shimadzu, Япония) с применением колонки Zebron ZB-5MS 30 mL×0,25 mm ID×0,25 μm df. Жидкая фаза состояла из 5%-полисиларилен-95%-полидиметилсилоксана; температурные пределы: от минус 60 °C до 325–350 °C; газ-носитель — гелий с постоянным потоком 1,0 мл/мин. Анализ осуществляли в изотермическом режиме; температура колонки — 250 °C; температура испарителя — 270 °C; температура ионного источника — 250 °C; температура интерфейса — 250 °C; напряжение на детекторе составляло 0,84 кВ; поток эмиссии — 60 μA; объем вводимой пробы — 5 μl [24].

Спектры ИК-Фурье получали на спектрофотометре ФСМ 2202 (ООО «Гранат-Е», Россия) с разрешением 4 $см^{-1}$ при 20 сканах. Измерения проводили с использованием приставки НПВО-Алмаз (ООО «Гранат-Е», Россия). Небольшое количество образца помещали на приставку и прижимали. Спектр снимали трижды на трех разных кусках одного образца. Анализ выполняли в режиме поглощения в диапазоне от 4000 до 400 $см^{-1}$ при комнатной температуре (24 °C).

3. Результаты и обсуждение

В результате проведенных исследований установлено, что количество липидной фракции, выделенной из люпина белого, составляло 9,65 ± 0,32 % (в пересчете на абсолютно сухое вещество).

Результаты содержания сквалена и сопутствующих веществ в изучаемом образце представлены на Рисунке 4 и в Таблице 2.

Результаты, представленные на Рисунке 4 и в Таблице 2, показывают, что исследуемый образец характеризуются разнообразным составом, но при этом отмечено, что он содержит до 34,57 % сквалена, кампестерола 10,24 %. Также выявлено, что в исследуемом образце содержится 2-метилоктакозан (содержание относительно других компонентов 9,62 %), генэйкозан (содержание относительно других компонентов 8,33 %) и β-ситостерол (содержание относительно других компонентов 8,99 %). Отмечено, что при экстракции в липидную фракцию перешел также люпеол (тритерпеноид), который свойствен люпину, плодам оливы [32,33].

Результаты выделения липидной фракции, которая содержит чистый сквален, с помощью тонкослойной хроматографии представлены на Рисунке 5.

Результаты, представленные на Рисунке 5, показывают, что метод колоночной хроматографии позволяет разделить липидную фракцию на сопутствующие вещества и целевой продукт (сквален). При последующем анализе методом ВЭЖХ получена фракция, содержащая чистый сквален без примесных компонентов.

Данные Рисунка 6 и Таблицы 3 свидетельствуют о том, что многоступенчатая экстракция позволяет выделить сквален из липидной фракции со степенью очистки 96,65 %.

Результаты ИК-Фурье спектрометрии (Рисунок 7) показали, что интенсивные полосы в области 3000–2800 $см^{-1}$ относятся к валентным колебаниям C–H алифатических цепей. Пики в области около 1600 $см^{-1}$ обусловлены колебаниями C=C-связей диеновой системы, характерной для сквалена и других алифатических углеводородов с несколькими двойными связями. В области 1200–700 $см^{-1}$ обычно наблюдаются слабые или среднеинтенсивные полосы скелетных колебаний для длинных алифатических цепей, что также наблюдается на полученном спектре.

Таким образом, в процессе реализации научно-исследовательской работы выделен сквален из липидной фракции. Установлено, что из липидной фракции люпина можно получить сквален со степенью чистоты 98 % при использовании смеси 95 % этанола и 50 % KOH. Далее проводится многостадийная экстракция системой гексан–вода, обработка полученной смеси сульфатом натрия, фильтрация и последующее разделение методом жидкостной хроматографии.

Многие исследователи в последнее время уделяют внимание методам выделения и очистки сквалена, в том числе из растительных источников [34–41].

Таблица 2. **Результаты анализа состава изучаемого образца липидной фракции**
Table 2. **Results of the analysis of the composition of the studied lipid fraction sample**

Номер пика	Время удерживания, мин	Наименование вещества	Содержание относительно других компонентов, %
1	31,60	Цис-9-гексадеценал	1,83
2	35,55	Гексакозан	2,32
3	36,33	Генэйкозан	4,57
4	38,04	6,9,12,15-докозатетраеновая кислота, метиловый эфир (CAS)	1,98
5	38,72	Сквален	34,57
6	40,09	2-метилоктакозан	9,62
7	40,90	Генэйкозан	8,33
8	42,33	Гексатриаконтан (CAS)	0,78
9	42,52	Холест-5-ен-3β-ил карбонат	6,60
10	43,12	Генэйкозан	2,93
11	44,38	Кампестерол	10,24
12	45,21	β-ситостерол	8,99
13	46,73	Люпеол	4,68
14	48,54	Стигмаст-4-и-3-один	1,62
15	49,42	Пентакозан	0,94

Таблица 3. **Результаты анализа состава изучаемого образца липидной фракции**
Table 3. **Results of the analysis of the composition of the studied lipid fraction sample**

Номер пика	Время удерживания, мин	Наименование вещества	Содержание относительно других компонентов, %
1	28,70	Гептадекан	1,24
2	31,97	Цис-9-гексадеценал	0,93
3	37,30	Пентакозановая кислота, метиловый эфир	1,18
4	37,50	Сквален	98



Рисунок 3. **Схема получения (выделения) сквалена**
Figure 3. **Scheme of production (extraction) of squalene**

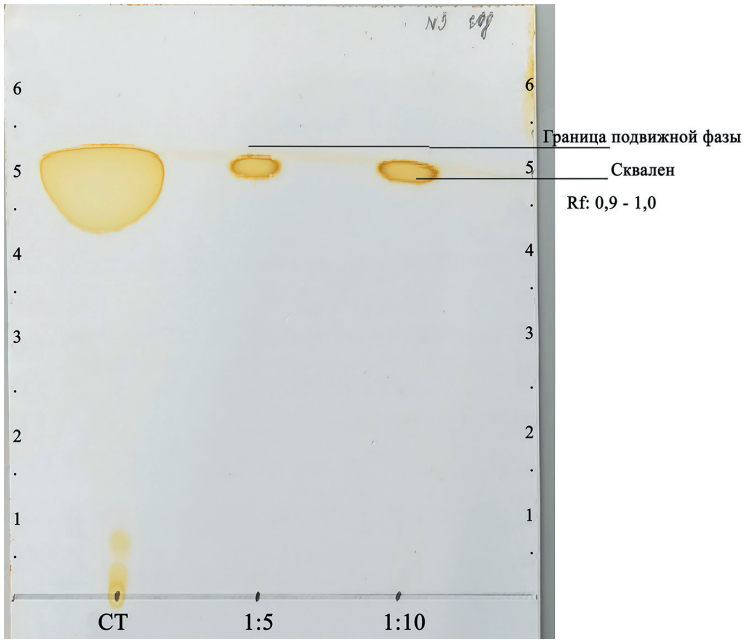


Рисунок 5. **Результаты тонкослойной хроматографии фракции, содержащей сквален, полученной методом ВЭЖХ**
Figure 5. **Results of thin layer chromatography of the squalene-containing fraction, obtained by HPLC**

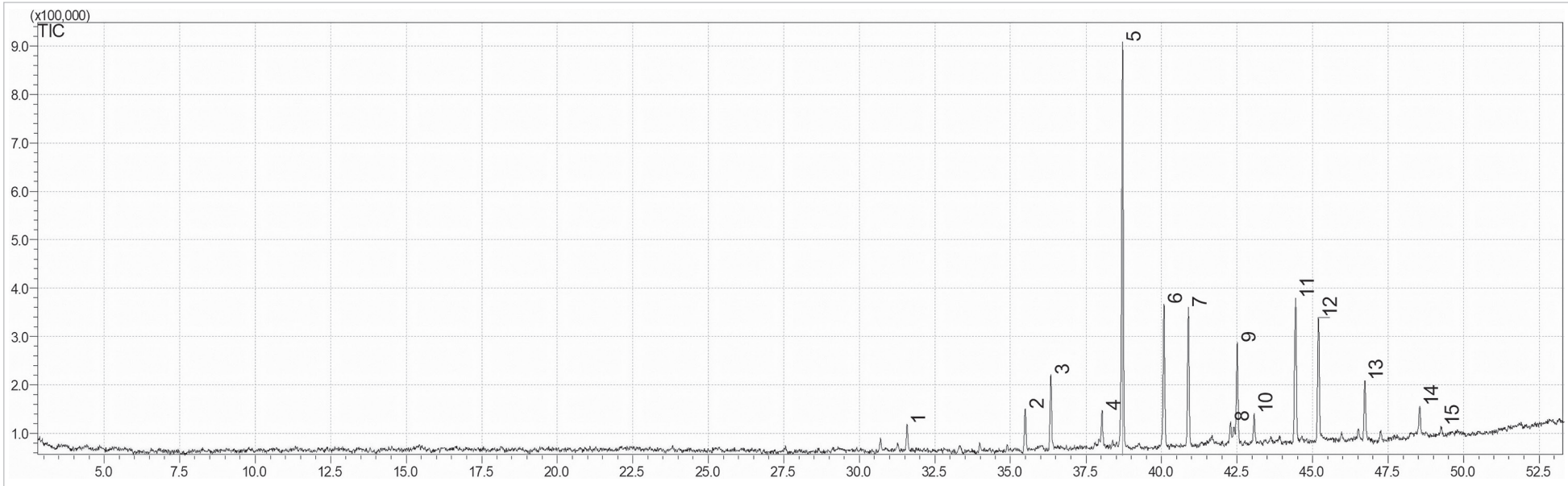


Рисунок 4. **Хроматограмма состава липидной фракции**
Figure 4. **Chromatogram of the composition of the lipid fraction**

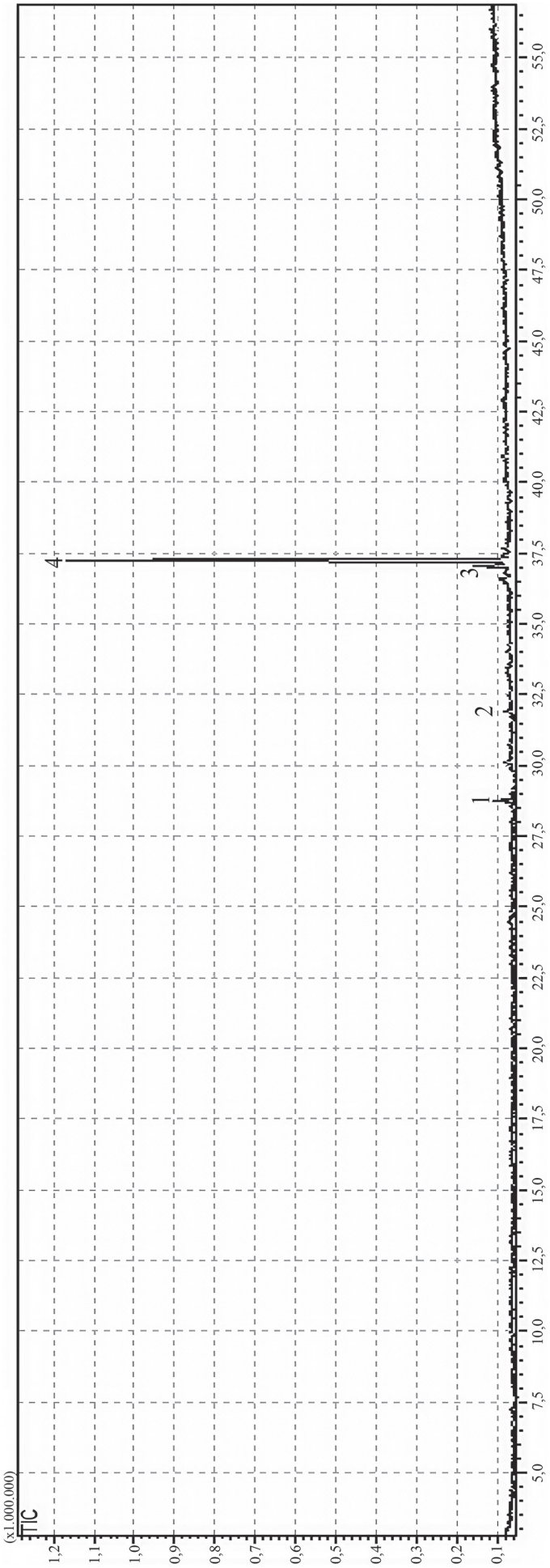


Рисунок 6. **Хроматограмма состава полученного образца сквалена**
Figure 6. **Chromatogram of the composition of the obtained squalene sample**

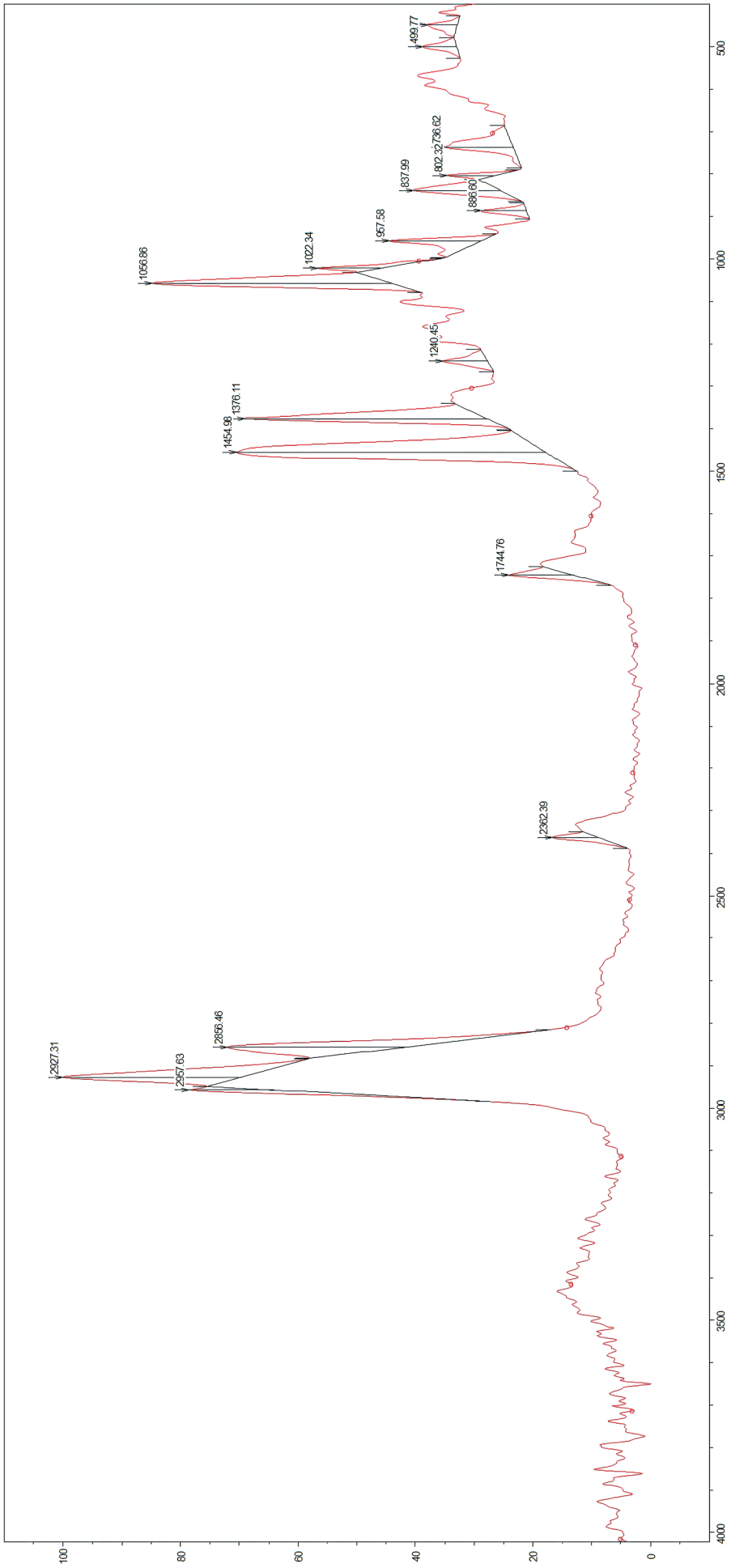


Рисунок 7. **ИК-Фурье спектр образца сквалена**
Figure 7. **FT-IR spectrum of the squalene sample**

Сквален приобрел важное значение как мощная биомолекула благодаря широкому спектру применения в различных отраслях, таких как биомедицина, нутрицевтика и косметика. Огромный спектр его биологической активности, включая антиоксидантные, кардиозащитные и противораковые свойства, в сочетании с широким спектром применения еще больше увеличил спрос на сквален во всем мире. Помимо наиболее распространенного метода, молекулярной дистилляции, в настоящее время используются устойчивые методы экстракции, такие как сверхкритическая жидкостная экстракция, для извлечения сквалена из различных источников. Хотя печень акулы традиционно рассматривается как основной источник сквалена, интенсивная ее эксплуатация привела к сокращению численности и угрозе вымирания ряда видов, что обусловило необходимость разработки мер по их охране и регулированию промысла. Это заставило исследователей по всему миру искать другие надежные источники сквалена. Качество экстрагированного сквалена в значительной степени зависит от типа и условий, используемых в процессе экстракции и очистки. Разработка оптимального протокола экстракции не всегда может гарантировать наилучшую применимость сквалена, поскольку он быстрее подвергается окислению, что влияет на его биодоступность. Инкапсуляция сквалена в подходящие матрицы может быть эффективной стратегией для решения проблемы окислительной нестабильности, что, в свою очередь, способствует расширению его применения, особенно в нутрицевтической отрасли [34].

Целью исследования [35] являлось выделение сквалена из масла семян *Lupinus mutabilis* методом прессования и его всесторонняя характеристика. Выход масла составил 44 % от общего содержания жира. Выход сквалена составил 25 %. Состав жировой фракции содержал, помимо сквалена, жирные кислоты (преимущественно ненасыщенные: олеиновая кислота (цис-9 C18:1, 44 г/100 г) и линолевая кислота (цис-9, цис-12 C18:2, 34 г/100 г)). Кроме того, жировая фракция люпина содержала 11 г/100 фосфолипидной фракции, представленной фосфатидилхолином, фосфатидилэтаноламином и лизофосфатидилхолином. Общее содержание фенольных соединений составило 99 мг галловой кислоты в эквиваленте (ГАЭ)/кг масла. Масло также содержало 7120 мг/кг стеролов и 494 мг/кг α-токоферола. Эти результаты демонстрируют потенциал масла семян *L. mutabilis*, полученного методом холодного отжима, однако жировая фракция содержала много примесей, что показало необходимость дополнительной очистки для получения сквалена для нутрицевтической промышленности [35].

В работе [36] исследована экстракция сквалена из амаранта методом сверхкритического диоксида углерода и оценка антиоксидантной активности экстрактов. Контролировали выход сквалена сверхкритическим CO_2 и содержание неомыляемой фракции. Экстракция была масштабирована с 50 мл до 500 мл. Выход масла амаранта, полученного с использованием 50 мл экстракционного сосуда в оптимальных условиях, составил 4,11 г/100 г семян. Выход липидов, выделенных гексаном в аппарате Сокслета, был выше (4,7 г/100 г семян) по сравнению с выходом масла, полученным методом экстракции сверхкритическим диоксидом углерода (4,11 и 3,99 г/100 г семян) в экстракционных сосудах объемом 50 мл и 500 мл соответственно.

В целом, выход сквалена из амаранта увеличивался с повышением давления, однако эта зависимость была различной для экстракций чистым CO_2 и в случае использования сорастворителя, что позволило получить более высокие выходы сквалена почти при всех приложенных давлениях. Например, при использовании 5 % сорастворителя выход значительно увеличивался при повышении давления до 35 МПа, в то время как дальнейшее повышение не оказывало существенного влияния на выход сквалена.

Содержание сквалена варьировалось от 5,62 до 14,88 г/100 г масла и от 0,204 до 0,305 г/100 г семян. Наибольшая концентрация сквалена в масле была определена при 15 МПа и без добавления сорастворителя (14,88 г/100 г); однако количество сквалена, извлеченного из семян в этих условиях, было наименьшим — 0,204 г/100 г. Хотя наибольшее содержание сквалена из 100 г семян амаранта было извлечено при 35 МПа и с 5 % сорастворителя (0,305 г/100 г), можно заметить, что процентное содержание этого соединения в экстрактах уменьшалось при добавлении сорастворителя, поскольку общий выход экстракта увеличивался, а сквален разбавлялся другими веществами. Различия в содержании сквалена в масле, экстрагированном при давлении выше 35 МПа, были незначительными ($p < 0,05$). Эти результаты могут быть использованы для получения фракции с высоким содержанием сквалена в масле, почти 15 % при 15 МПа с использованием чистого CO_2. Учитывая низкий выход экстракта в этих условиях, оставшиеся материалы могут быть экстрагированы при более высоком давлении с использованием сорастворителя для более полного извлечения других веществ. По мнению Bruni и др. [37], различия в растворимости компонентов, присутствующих в материале, могут быть обусловлены соэкстрагированными веществами, которые могут мешать экстракции сквалена. Bhattacharjee и др. [38] изучали растворимость сквалена в различных условиях сверхкритического CO_2 и предположили, что количество сквалена увеличивается с повышением давления и понижением температуры. Наибольший выход сквалена (1,36 мг/г семян) в их исследовании был получен при 55 МПа и 100 °C. По сравнению с нашими результатами, выход сквалена, экстрагированного чистым сверхкритическим CO_2, составил 2,73 мг/г семян при давлении 55 МПа и температуре 40 °C, в то время как добавление 5 % этанола в тех же условиях увеличило выход сквалена всего на 5 % (2,89 мг/г семян). Не и др. [39] сообщили, что содержание сквалена в экстрактах составляло от 0,05 до 0,31 г/100 г, при этом наибольший выход был получен при 20 МПа и 50 °C; при увеличении давления до 30 МПа и температуры до 70 °C выход сквалена существенно не изменился. В исследовании [36] использование 5 % этанола увеличило выход сквалена при давлении 35 МПа и температуре 40 °C на 13 %, до 0,305 г/100 г семян. Полученные результаты показывают, что полярный растворитель незначительно повышает экстрагируемость сквалена сверхкритическим CO_2, что вполне объяснимо для липофильных соединений.

В исследовании [40] были использованы экологически чистые методы экстракции сквалена, такие как сверхкритическая флюидная экстракция (СФЭ) и СФЭ с последующей экстракцией расширенной газом жидкостью с использованием смесей этанола и CO_2. СФЭ позволила получить сквален с выходом экстракции от 12,27 ± 0,02 до 14,5 ± 0,2 %, на который существенно влияли температура (40 и 60 °C) и давление (150–350 бар). Экстракты, полученные методом СФЭ, показали высокую концентрацию токоферола, особенно α-токоферола (116,7–296,9 мкг/г масла) и γ-токоферола (2006–4749 мкг/г масла). Профили жирных кислот были схожи, хотя и несколько различались по составу, что требовало подбора методов очистки фракции сквалена. Однако эти результаты подчеркивают потенциал данного подхода для повышения питательной и коммерческой ценности пищевых продуктов на основе сквалена, выделенного из люпина [40].

В обзоре [41] рассматриваются последние данные о биологической активности, природных и генетически модифицированных растениях, тенденциях в технологиях экстракции и системах доставки сквалена, что открывает инновационные перспективы для крупномасштабного производства и применения сквалена. Исследование показывает, что инновационные, экологически чистые и устойчивые технологии экстракции становятся заменой традиционным технологиям. Кроме того, системы доставки могут использоваться для поддержания окислительной стабильности и эффективности сквалена в пищевых продуктах [41].

Необходимость разработки функциональных продуктов питания со скваленом обусловлена тем, что человек с возрастом теряет способность к синтезу сквалена. Так, в последних работах отмечено, в организме человека синтез сквалена с возрастом снижается [6,16]. Следовательно, его дефицит необходимо удовлетворять за счет потребления продуктов питания, обогащенных скваленом. Не стоит забывать, что всего 65–80 % сквалена усваивается при оральном потреблении [6,16].

Согласно анализа современной научной и технической литературы, в настоящее время разработано крайне мало продуктов, содержащих сквален [42–45].

Так, Sponton и др. [43] разработали инкапсулированный сквален. При этом для инкапсуляции порошкообразного сквалена, выделенного из кукурузного масла, Спонтон О. Э. использовал наночастицы яичного белка. Условиями были масляная фракция (0,1–0,2), количество белка (2–5 мас.%), давление гомогенизации (100 и 200 бар) и количество мальтодекстрина (10–20 мас.%). При содержании масляной фракции 0,15 %, концентрации белка 5 мас.%, давлении гомогенизации 200 бар и содержании мальтодекстрина 20 % была достигнута максимальная эффективность инкапсуляции. Инкапсулированный продукт представляет собой порошок, который характеризуется высокими эмульгирующими свойствами. Авторы разработки отмечают, что эмульгирующая способность инкапсулированного сквалена значительно выше эмульгирующей способности нативного яичного белка [43]. Исследователи предлагают использовать инкапсулированный сквален в производстве функционального хлеба. В своих работах авторы показали, что добавление сквалена в рецептуру хлеба не изменяет его физико-химические показатели качества, а также не оказывает отрицательного влияния на органолептические

и текстурные (реологические) свойства готового продукта. Но при этом отмечено, что неинкапсулированный сквален распадается в процессе термической обработки готового продукта, чего не наблюдается при применении инкапсулированного сквалена [43].

На основе инкапсулированного сквалена также разработаны кексы. Изучение физико-химических, реологических, текстурных и сенсорных показателей качества кексов позволило выявить, что добавление в рецептуру кексов инкапсулированного сквалена позволяет значительно повысить их значения. В частности, ученый отмечает, что новые кексы характеризуются более упорядоченной структурой, меньшей жесткостью и липкостью при жевании, а также повышенной упругостью, целостностью и меньшей крошливостью. Кроме того, они обладают увеличенным сроком хранения за счет антимикробных и антиоксидантных свойств. За счет снижения содержания высококалорийных компонентов при добавлении сквалена полученные кексы характеризовались пониженной калорийностью (от 480,78±0,10 до 501,61±0,38 ккал). Также автором исследования отмечено, что сквален помогает повысить выход готового продукта, так как он способствует сохранению влаги в мякише готового продукта [44]. Следовательно, разработанная система инкапсуляции была пригодна для получения функционального хлеба и кексов на основе обогащения сквалена.

Результаты научного исследования Herrera-Marcos и соавторов [45] свидетельствуют о том, что сквален, благодаря своим биологическим свойствам, можно использовать также в качестве самостоятельной биологически активной добавки, пищевой добавки, имеющей препаративную форму в виде таблетки или желатиновой капсулы. Такой товарный вид сквалена обеспечивает точную дозировку и удобен для приема. Установлено, что применение пищевой добавки, содержащей 2% природного сквалена, приводит к увеличению активности дыхательных маркерных ферментов (НАДН-дегидрогеназа, цитохром-с-оксидаза), замедлению реакций перекисного окисления липидов в митохондриях и снижению образования малонового диальдегида. Кроме того, наблюдается повышение синтеза ферментов цикла трикарбоновых кислот (малатдегидрогеназа, α-кетоглутаратдегидрогеназа, изоцитратдегидрогеназа, сукцинатдегидрогеназа), а также усиление выработки аденозинтрифосфата (АТФ) митохондриями. Таким образом, пищевая (биологически активная) добавка сквалена в живом организме повышает окислительную защитную систему митохондрий за счет инициации процессов синтеза и активности антиперекисной ферментной системы, состоящей из каталазы и супероксиддимутазы, и глутатионзависимых антиоксидантных ферментов (глутатионпероксидазы и глутатион-S-трансферазы) [46].

Определено, что пероральный прием сквалена инициирует процесс синтеза холестерина. Так, исследования с участием людей показали, что при пероральном приеме добавки сквалена в дозе 500 мг синтез холестерина увеличивался в течение 9–24 часов. Кроме того, сквален способствовал увеличению концентрации ланостерола в крови человека. Также некоторыми авторами отмечено, что сквален широко используется в терапевтических целях в виде вакцины [47,48], в виде порошка, предназначенного для добавления в различные оздоровительные напитки, соки и смузи [45,48,49].

Таким образом, результаты исследований, указанных в работах [44–49], подтверждают, что нативный и инкапсулированный сквален представляют собой функциональные ингредиенты для создания инновационных продуктов профилактического назначения, обладающих антиоксидантными и антимикробными свойствами и характеризующихся высоким терапевтическим потенциалом. Однако на данный момент выполнено ограниченное количество исследований по разработке функциональных продуктов питания на основе сквалена, а существующие продукты не получили широкого распространения в рационе людей, ведущих здоровый образ жизни, поскольку содержат простые сахара. Поэтому научному сообществу необходимо разработать стратегию по расширению ассортимента продуктов питания, в рецептуру которых будет входить незаменимый для жизнедеятельности человека сквален. Как было отмечено ранее, сквален является предшественником холестерина, который является базисом для синтеза многих гормонов человека [12]. Недостаток сквалена в живом организме может привести к серьезным гормональным нарушениям.

4. Выводы

Таким образом, в ходе работы был изучен процесс выделения и очистки фракции сквалена из люпина белого. Для этого выделяли липидную фракцию из люпина белого методом Сокслета. Установлено, что люпин белый, собранный в Калининградской области, содержал 9,65±0,32% липидной фракции. Липидная фракция люпина белого содержала до 34,57% сквалена, до 10,24% кампестерола. В исследуемом образце люпина белого были обнаружены 2-метилоктакозан, генэйкозан и β-ситостерол (9,62%, 8,33% и 8,99% соответственно). В липидной фракции содержался также люпеол (тритерпеноид). Содержание сквалена определяли методом хроматографии. Используя метод ВЭЖХ, удалось получить фракцию, содержащую чистый сквален. Установлено, что из липидной фракции люпина с помощью многостадийной экстракции и жидкостной хроматографии можно получить сквален со степенью чистоты 98%.

При анализе перспективных направлений дальнейших исследований следует учитывать, что интерес научного сообщества к сквалену в последние годы существенно возрос, главным образом благодаря его полезным свойствам. Широко обсуждается гипотеза о его способности насыщать организм кислородом, что рассматривается как возможный фактор, связанный с адаптацией глубоководных акул к условиям низкого содержания кислорода. Тем не менее прямые экспериментальные подтверждения этой гипотезы отсутствуют. За счет липофильной природы сквалена он не реагирует с водой без достаточной активации, поэтому его предполагаемая способность выделять молекулярный кислород требует дальнейших исследований.

Что касается дыхательных функций на клеточном уровне, сквален может потенциально играть вспомогательную роль в условиях гипоксии. При этом организм использует кислород исключительно на завершающей стадии дыхательного процесса. Если доступ кислорода ограничен, активируются альтернативные механизмы — например, анаэробное дыхание. Этот процесс позволяет реакциям происходить с использованием других акцепторов электронов, таких как нитраты, сульфаты или карбонаты. Анаэробное окисление не приводит к образованию воды, но запускает метаболические цепочки, способствующие выживанию клеток. Таким образом, сквален положительно влияет на профилактику сердечно-сосудистых заболеваний у человека. Предполагается, что выделенный из люпина белого сквален может использоваться для изготовления пищевых добавок и функциональных продуктов питания.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / REFERENCES

1. Kim, S.-K., Karadeniz, F. (2012). Biological importance and applications of squalene and squalene. Chapter in a book: Advances in Food and Nutrition Research. Elsevier, 2012. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-416003-3.00014-7
2. Barp, L., Miklavčič Višnjevec, A., Moret, S. (2024). Analytical determination of squalene in extra virgin olive oil and olive processing by-products, and its valorization as an ingredient in functional food-a critical review. *Molecules*, 29(21), Article 5201. https://doi.org/10.3390/molecules29215201
3. Wu, L., Zhao, J., Wu, L., Zhang, Y., Li, J. (2022). Simultaneous determination of squalene, tocopherols and phytosterols in edible vegetable oil by SPE combined with saponification and GC–MS. *LWT*, 169, Article 114026. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.114026
4. Pacetti, D., Scortichini, S., Boarelli, M.C., Fiorini, D. (2019). Simple and rapid method to analyse squalene in olive oils and extra virgin olive oils. *Food Control*, 102, 240–244. https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2019.03.005
5. Yuan, C., Xie, Y., Jin, R., Ren, L., Zhou, L., Zhu, M. et al. (2017). Simultaneous analysis of tocopherols, phytosterols, and squalene in vegetable oils by high-performance liquid chromatography. *Food Analytical Methods,* 10(11), 3716–3722. https://doi.org/10.1007/s12161-017-0927-x
6. Gohil, N., Bhattacharjee, G., Khambhati, K., Braddick, D., Singh, V. (2019). Engineering strategies in microorganisms for the enhanced production of squalene: Advances, challenges and opportunities. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 7, Article 50. https://doi.org/10.3389/fbioe.2019.00050
7. Park, S.Y., Choi, S.J., Park, H.J., Ma, S.Y., Moon, Y.I., Park, S.-K. et al. (2020). Hexane extract of green tea (*Camellia sinensis*) leaves is an exceptionally rich source of squalene. *Food Science and Biotechnology,* 29, 769–775. https://doi.org/10.1007/s10068-019-00724-3
8. Purkiewicz, A., Czaplicki, S., Pietrzak-Fiećko, R. (2022). The occurrence of squalene in human milk and infant formula. *International Journal of Environmental Research and Public Health,* 19(19), Article 12928. https://doi.org/10.3390/ijerph191912928
9. Azri, A., Debouba, M., Bouajila, J., Yeshitila, M., Cerny, M., Lacroux, E. et al. (2025). Lipids composition, fatty acid and squalene contents in a wide Amaranth collection. *Journal of Food Composition and Analysis*, 148(Part 2), Article 108305. https://doi.org/10.1016/j.jfca.2025.108305
10. Lozano-Grande, M.A., Gorinstein, S., Espitia-Rangel, E., Dávila-Ortiz, G., Martínez-Ayala, A.L. (2018). Plant sources, extraction methods, and uses of squalene. *International Journal of Agronomy,* 2018, Article 1829160. https://doi.org/10.1155/2018/1829160
11. Ryan, E., Galvin, K., O'Connor, T. P., Maguire, A.R., O'Brien, N.M. (2007). Phytosterol, squalene, tocopherol content and fatty acid profile of selected seeds,

grains, and legumes. *Plant Foods for Human Nutrition,* 62(3), 85–91. https://doi.org/10.1007/s11130-007-0046-8
12. Popa, O., Băbeanu, N. E., Popa, I., Niţă, S., Dinu-Pârvu, C. E. (2015). Methods for obtaining and determination of squalene from natural sources. *BioMed Research International,* 2015(1), Article 367202. https://doi.org/10.1155/2015/367202
13. Sheng, Y. Y., Xiang, J., Wang, K. R., Li, Z. Y., Li, K., Lu, J. L. et al. (2022) Extraction of squalene from tea leaves (*Camellia sinensis*) and its variations with leaf maturity and tea cultivar. *Frontiers in Nutrition*, 9, Article 755514. https://doi.org/10.3389/fnut.2022.755514
14. Vázquez, L., Torres, C. F., Fornari, T., Señoráns, F.J., Reglero, G. (2007). Recovery of squalene from vegetable oil sources using countercurrent supercritical carbon dioxide extraction. *Journal of Supercritical Fluids*, 40(1), 59–66. https://doi.org/10.1016/j.supflu.2006.04.012
15. Nergiz, C., Çelikkale, D. (2011). The effect of consecutive steps of refining on squalene content of vegetable oils. *Journal of Food Science and Technology*, 48(3), 382–385. https://doi.org/10.1007/s13197-010-0190-2
16. Cheng, L., Ji, T., Zhang, M., Fang, B. (2024). Recent advances in squalene: Biological activities, sources, extraction, and delivery systems. *Trends in Food Science and Technology,* 146(1), Article 104392. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2024.104392
17. Kalogeropoulos, N., Andrikopoulos, N. K. (2004). Squalene in oils and fats from domestic and commercial fryings of potatoes. *International Journal of Food Sciences and Nutrition,* 55(2), 125–129. https://doi.org/10.1080/09637480410001666531
18. Gunes, F. (2013). Medical use of squalene as a natural antioxidant. *Journal of Marmara University Institute of Health Sciences*, 3(4), 221–229. https://doi.org/10.5455/musbed.20131213100404
19. Duan, Y., Gong, K., Xu, S., Zhang, F., Meng, X., Han, J. (2022). Regulation of cholesterol homeostasis in health and diseases: From mechanisms to targeted therapeutics. *Signal Transduction and Targeted Therapy,* 7, Article 265. https://doi.org/10.1038/s41392-022-01125-5
20. Panov, A.V., Mayorov, V.I., Dikalov, S.I. (2024). Role of fatty acids β-oxidation in the metabolic interactions between organs. *International Journal of Molecular Sciences,* 25(23), Article 12740. https://doi.org/10.3390/ijms252312740
21. Самков, А. А., Волченко, Н. Н., Худокормов, А. А., Калашников, А. А., Веселовская, М. В. (2014). Анаэробная биодеградация органических соединений в микробных топливных элементах. *Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета*, 101, 496–510. [Samkov, A. A., Volchenko, N. N., Khudokormov, A. A., Kalashnikov, A. A., Veselovskaya, M. V. (2014). Anaerobic biodegradation of organic compounds in microbial fuel cells. *Polythematic Online Scientific Journal of Kuban State Agrarian University*, 101, 496–510. (In Russian)]
22. Zhao, H., Song, Z., Liu, X., Gong, S., Tang, Q., Liu, C. et al. (2025). Functional characterization of squalene epoxidases from *Siraitia grosvenorii*. *Plants*, 14(12), Article 1740. https://doi.org/10.3390/plants14121740
23. Rosales-Garcia, T., Jimenez-Martinez, C., Davila-Ortiz, G. (2017). Squalene extraction: Biological sources and extraction methods. *International Journal of Environment, Agriculture and Biotechnology*, 2(4), 1662–1670. https://doi.org/10.22161/ijeab/2.4.26
24. Кувакин, С. Г., Харченко, С. М., Королева, Ю. А., Кириллова, Д. Д., Шаталов, Д. О. (29 ноября 2025). Разработка методов стандартизации сквалена. Сборник материалов XI Всероссийской научно-практической конференции с международным участием: Перспективы внедрения инновационных технологий в медицине и фармации. Электрогорск: АО «ЭКОлаб»; Орехово-Зуево: ГГТУ, 2025. [Kuvakin S. G., Kharchenko S. M., Koroleva Yu.A., Kirillova D. D., Shatalov D. O. (November 29, 2025). Development of methods for squalene standardization. Proceedings of the 11th All-Russian scientific-practical conference with international participation: Prospects of introduction of innovative technologies in medicine and pharmaceutics. Elektrogorsk: JSC "ECOlab"; Orekhovo-Zuyevo: GGTU, 2025. (In Russian)]
25. Лобода, А. В., Никонович, С. Н., Тимофеенко, Т. И. (2009). Биологически активная добавка «Сквален-Лецитин» на основе семян амаранта. Краснодар: Издательский Дом Юг, 2009. [Loboda, A. V., Nikonovich, S. N., Timofeyenko, T. I. (2009). Biologically active additive "Squalene-Lecithin" based on amaranth seeds. Krasnodar: Publishing House Yug, 2009. (In Russian)]
26. Агафонова, С. В., Рыков, А. И. (2021). Химический состав семян растения *Lupinus angustifolius* L. и *Lupinus albus* L. Калининградской области. *Химия растительного сырья*, 3, 135–142. [Agafonova, S.V., Rykov, A.I. (2021). Chemical composition of seeds of plants *Lupinus angustifolius* L. and *Lupinus albus* L. of the Kaliningrad region. *Khimija Rastitel'nogo Syr'ja*, 3, 135–142. (In Russian)] https://doi.org/10.14258/jcprm.2021038358
27. Писарев, Д. И., Новиков, О. О., Бочарникова, М. А., Васильева, Ю. Г., Малютина, А. Ю. (2016). Разработка методики определения содержания сквалена в некоторых растительных жирных маслах. *Научный результат. Медицина и фармация,* 2(4), 43–53. [Pisarev, D. I., Novikov, O. O., Bocharnikova, M. A., Vasilyeva, Yu. G., Malyutina, A. Yu. (2016). Название по данным журнала: Development of techniques for quantification of squalene in certain vegetable fatty oils. *Research Result. Medicine and Pharmacy*, 2(4), 43–53. (In Russian)] https://doi.org/10.18413/2313-8955-2016-2-4-43-53
28. Терехова, Т. С., Фурсова, А. В., Офицеров, Е. Н. (2013). Качественное и количественное определение сквалена в маслах и реакционных смесях методом ВЭЖХ. *Успехи в химии и химической технологии*, 27(4(144)), 84–89. [Terekhova, T.S., Fursova, A.V., Ofitserov, E.N. (2013). The qualitative and quantitative determination of squalene in vegetable oil and reaction mixtures by HPLC. *Advances in Chemistry and Chemical Technology*, 27(4(144)), 84–89. (In Russian)]
29. He, H.-P., Cai, Y., Sun, M., Corke, H. (2002). Extraction and purification of squalene from amaranthus grain. *Journal of Agricultural and Food Chemistry,* 50(2), 368–372. https://doi.org/10.1021/jf010918p
30. Wandira, I., Legowo, E. H., Widiputri, D. I. (2017). Optimization of squalene produced from crude palm oil waste. *AIP Conference Proceedings*, 1803(1), Article 020061. https://doi.org/10.1063/1.4973188
31. Павлова, О. В., Калистратова, А. В., Офицеров, Е. Н. (2020). К проблеме определения сквалена в масле растений рода *Amaranthus* и продуктах его трансформации. *Успехи в химии и химической технологии*, 34(7(230)), 32–34. [Pavlova, O. V., Kalistratova, A. V., Ofitserov, E. N. (2020). On the problem of ddetermining squalene in the oil of plants of the Genus *Amaranthus* and the products of its transformation. *Advances in Chemistry and Chemical Technology*, 34(7(230)), 32–34. (In Russian)]
32. Siddique, H. R., Saleem, M. (2011). Beneficial health effects of lupeol triterpene: A review of preclinical studies. *Life Sciences*, 88(7–8), 285–293. https://doi.org/10.1016/j.lfs.2010.11.020
33. AlMousa, L. A., Pandey, P., Lakhanpal. S., Kyada, A. K., Nayak. P. P., Hussain, A. et al. (2025). An updated review deciphering the anticancer potential of pentacyclic triterpene lupeol and its nanoformulations. *Frontiers in Pharmacology*, 9(16), Article 1594901. https://doi.org/10.3389/fphar.2025.1594901
34. Kumar, L. R. G., Tejpal, C. S., Anas, K. K., Chatterjee, N. S., Anandan, R., Mathew, S. et al. (2023). Squalene: Bioactivity, extraction, encapsulation, and future perspectives. Chapter in a book: Marine Antioxidants, Elsevier, 2023. https://doi.org/10.1016/B978-0-323-95086-2.00038-2
35. Bañares, C., Antezana, A.V., Chabni, A., Ramirez-Veliz, C., Intiquilla, A., Jiménez-Aliaga, K. et al. (2026). Revalorization of *Lupinus mutabilis* seed oil via clean expeller extraction and comprehensive chemical characterization. *Journal of Food Composition and Analysis,* 152, Article 109023. https://doi.org/10.1016/j.jfca.2026.109023
36. Kraujalis, P. (2014). Optimisation of fractionation process of amaranth (*Amaranthus* spp.) by applying high pressure extraction methods. Doctoral Dissertation Kaunas University of Technology, Technological Sciences, Chemical Engineering, 05T. Kaunas, 2014.
37. Bruni, R, Guerrini, A, Scalia, S, Romagnoli, C, Sacchetti, G. (2002). Rapid techniques for the extraction of vitamin E isomers from *Amaranthus caudatus* seeds: ultrasonic and supercritical fluid extraction. *Phytochemical Analysis,* 13(5), 257–261. https://doi.org/10.1002/pca.651
38. Bhattacharjee, P., Chatterjee, D., Singhal, R. (2012). Supercritical carbon dioxide extraction of squalene from *Amaranthus paniculatus*: Experiments and process characterization. *Food and Bioprocess Technology,* 5, 2506–2521. https://doi.org/10.1007/s11947-011-0612-9
39. He, H.-P., Corke, H. (2003). Oil and squalene in *Amaranthus* grain and leaf. *Journal of Agricultural and Food Chemistry,* 51(27), 7913–7920. https://doi.org/10.1021/jf030489q
40. Náthia-Neves, G., Getachew, A. T., Ghelichi, S., Jacobsen, C. (2025). The use of green technologies for processing lupin seeds (*Lupinus angustifolius* L.): Extraction of non-polar and polar compounds for concentrated-protein flour production. *Food Research International*, 200, Article 15434. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2024.115434
41. Adi, P., Mutiara, W. (2024). Review: Exploration of squalene from natural materials as its potential in health and food fields. *Indonesian Journal of Chemical Engineering*, 2(2), 79–89. https://doi.org/10.26555/ijce.v2i2.1423
42. Narayan Bhilwade, H., Tatewaki, N., Nishida, H., Konishi, T. (2010). Squalene as novel food factor. *Current Pharmaceutical Biotechnology,* 11(8), 875–880. https://doi.org/10.2174/138920110793262088
43. Sponton, O. E., Perez, A. A., Osella, C., Cuffia, F., Fenoglio, C., Piagentini, A., Santiago, L. G. (2023). Squalene encapsulation by emulsification and freeze-drying process: Effects on bread fortification. *Journal of Food Science,* 88(6), 2523–2535. https://doi.org/10.1111/1750-3841.16576
44. Kumar, L.R.G., Sanath Kumar, H., Tejpal, C.S., Anas, K.K., Nayak, B.B., Sarika, K. et al. (2021). Exploring the physical and quality attributes of muffins incorporated with microencapsulated squalene as a functional food additive. *Journal of Food Science and Technology,* 58(12), 4674–4684. https://doi.org/10.1007/s13197-020-04955-9
45. Herrera-Marcos, L.V., Martínez-Beamonte, R., Arnal, C., Barranquero, C., Puente-Lanzarote, J.J., Herrero-Continente, T. et al. (2023). Dietary squalene supplementation decreases triglyceride species and modifies phospholipid lipidomic profile in the liver of a porcine model of non-alcoholic steatohepatitis. *Journal of Nutritional Biochemistry*, 112, Article 109207. https://doi.org/10.1016/j.jnutbio.2022.109207
46. Buddhan, S., Sivakumar, R., Dhandapani, N., Ganesan, B., Anandan, R. (2007). Protective effect of dietary squalene supplementation on mitochondrial function in liver of aged rats. *Prostaglandins Leukot Essent Fatty Acids*, 76(6), 349–355. https://doi.org/10.1016/j.plefa.2007.05.001
47. Micera, M., Botto, A., Geddo, F., Antoniotti, S., Bertea, C.M., Levi, R. et al. (2020). Squalene: More than a step toward sterols. *Antioxidants*, 9(8), Article 688. https://doi.org/10.3390/antiox9080688
48. Reddy, L.H., Couvreur, P. (2009). Squalene: A natural triterpene for use in disease management and therapy. *Advanced Drug Delivery Reviews,* 61, 1412–1426. https://doi.org/10.1016/j.addr.2009.09.005
49. Narayan Bhilwade, H., Tatewaki, N., Nishida, H., Konishi, T. (2010). Squalene as novel food factor. *Current Pharmaceutical Biotechnology,* 11(8), 875–880. https://doi.org/10.2174/138920110793262088

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ	AUTHOR INFORMATION
Принадлежность к организации	**Affiliation**
Ульрих Елена Викторовна — доктор технических наук, профессор, кафедра инжиниринга технологического оборудования, Калининградский государственный технический университет 236022, Калининград, проспект Советский, 1 E-mail: elena.ulrikh@klgtu.ru ORCID: http://orcid.org/0000-0003-4107-7277 * автор для контактов	**Elena V. Ulrikh**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Technological Equipment Engineering, Kaliningrad State Technical University 1, Prospekt Sovetskiy, 236022, Kaliningrad, Russia E-mail: elena.ulrikh@klgtu.ru ORCID: http://orcid.org/0000-0003-4107-7277 * corresponding author
Критерии авторства	**Contribution**
Автор самостоятельно подготовил рукопись и несет ответственность за плагиат.	Completely prepared the manuscript and is responsible for plagiarism.
Конфликт интересов	**Conflict of interest**
Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.	The author declare no conflict of interest.

DOI: https://doi.org/10.21323/2618-9771-2026-9-2-192-198

Received 06.02.2026
Accepted in revised 27.04.2026
Accepted for publication 30.04.2026
© Sakhraoui A., Touati N., Hihat S., Madagh B., Blando F., 2026
Available online at https://www.fsjour.com/jour
Original scientific article
Open access

ANTIMICROBIAL EVALUATION OF THE HYDRO-SOLUBLE EXTRACT FROM *OPUNTIA FICUS-INDICA* SEEDS AGAINST BACTERIAL AND FUNGAL PATHOGENS

Amira Sakhraoui[1], Noureddine Touati[2, 3, *], Soraya Hihat[3, 4], Bilal Madagh[2], Federica Blando[5]

[1] Laboratory of Characterization and Valorization of Natural Resources, University Mohamed El Bachir El Ibrahimi of Bordj Bou Arreridj, Algeria
[2] Laboratory of Health and Environment, University Mohamed El Bachir El Ibrahimi of Bordj Bou Arreridj, Algeria
[3] Faculty of Natural Science and Earth and Universe, University Mohamed El Bachir El Ibrahimi of Bordj Bou Arreridj, Algeria
[4] Laboratory of Biomathematics Biophysic, Biochemical and Scientometry, University of Bejaia, Algeria
[5] Research Unit of Lecce, Institute of Sciences of Food Production (ISPA), National Research Council (CNR), Lecce, Italy

KEYWORDS:
Opuntia ficus-indica, hydro-soluble extract, antibacterial activity, antifungal activity, pathogenic bacteria

ABSTRACT

The increasing emergence of antimicrobial resistance requires the development of alternative natural bioactive compounds. This research describes the evaluation of the antimicrobial activity of hydro-soluble extracts from *Opuntia ficus-indica* seeds. Seeds of *Opuntia ficus-indica* were collected from the Bordj Bou Arreridj region (Algeria). Hydro-soluble extracts were prepared and tested against selected bacterial and fungal strains using the disk diffusion method. Different concentrations were applied, and inhibition zones were measured to assess the antimicrobial activity. The extract exhibited low antibacterial activity, with inhibition observed only at 110 mg/mL against specific bacterial strains. In contrast, the significant antifungal activity was recorded, with clear inhibition zones against several fungi and yeasts. The results indicate a selective antimicrobial effect, suggesting that the bioactive compounds present in the extract are more active against fungal microorganisms than bacteria. Hydro-soluble extracts of *Opuntia ficus-indica* seeds constitute a potential natural source of antifungal agents with limited antibacterial effects. These findings support their potential application in antifungal formulations and encourage further studies to identify active compounds and elucidate their mechanisms of action.

FUNDING: This work was funded by the Algerian Ministry of Higher Education and Scientific Research (PRFU project grant N° D00L01UN340120190001).

ACKNOWLEDGEMENTS: Authors are grateful to Dr. Mekhoukh Nasreddine who helped us to carry out this work.

Поступила 06.02.2026
Поступила после рецензирования 27.04.2026
Принята в печать 30.04.2026
© Сахрауи А., Туати Н., Хихат С., Мадаг Б., Бландо Ф., 2026
https://www.fsjour.com/jour
Научная статья
Открытый доступ

ОЦЕНКА АНТИМИКРОБНЫХ СВОЙСТВ ВОДОРАСТВОРИМОГО ЭКСТРАКТА ИЗ СЕМЯН ОПУНЦИИ ИНДИЙСКОЙ ПРОТИВ БАКТЕРИАЛЬНЫХ И ГРИБКОВЫХ ПАТОГЕНОВ

Сахрауи А.[1], Туати Н.[2, 3, *], Хихат С.[3, 4], Мадаг Б.[2], Бландо Ф.[5]

[1] Лаборатория характеристики и оценки природных ресурсов, кафедра пищевых наук, факультет биологии и естественных наук, Земли и Вселенной, Университет Мохаммеда Эль-Бахира Эль-Ибрахими в Бордж-Бу-Арреридже, Бордж-бу-Арреридж, Алжир
[2] Лаборатория охраны здоровья и окружающей среды, кафедра пищевых наук, факультет биологии и естественных наук, Земли и Вселенной, Университет Мохаммеда Эль-Бахира Эль-Ибрахими в Бордж-Бу-Арреридже, Бордж-бу-Арреридж, Алжир
[3] Кафедра пищевых наук, факультет биологии и естественных наук, Земли и Вселенной, Университет Мохаммеда Эль-Бахира Эль-Ибрахими в Бордж-Бу-Арреридже, Бордж-бу-Арреридж, Алжир
[4] Лаборатория биоматематики, биофизики, биохимии и наукометрии, Университет Беджайи, Беджайн, Алжир
[5] Исследовательское подразделение в Лечче, Институт наук о производстве пищевых продуктов (ISPA), Национальный исследовательский совет (CNR), Лечче, Италия

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:
Опунция индийская, водорастворимый экстракт, антибактериальная активность, противогрибковая активность, патогенные бактерии

АННОТАЦИЯ

Увеличение проблемы возникновения устойчивости к противомикробным препаратам требует разработки альтернативных натуральных биоактивных соединений. В данной работе описывается определение антимикробной активности водорастворимых экстрактов из семян опунции индийской. Семена опунции индийской были собраны в регионе Бордж-Бу-Арреридж (Алжир). Были приготовлены водорастворимые экстракты и тестированы против отдельных штаммов бактерий и грибов, используя метод диффузии в агар. Были применены различные концентрации и измеряли зоны ингибирования для оценки антимикробной активности. Экстракт проявил низкую антибактериальную активность против определенных штаммов бактерий с ингибированием только при концентрации 110 мг/мл. Напротив, была зарегистрирована существенная противогрибковая активность против некоторых грибов и дрожжей с четкими зонами ингибирования. Результаты указывают на избирательный антимикробный эффект, что говорит о том, что биоактивные соединения, присутствующие в экстракте более активны против грибковых микроорганизмов, по сравнению с бактериями. Водорастворимые экстракты семян опунции индийской представляют собой потенциальный натуральный источник противогрибковых средств с ограниченным антибактериальным эффектом. Эти результаты поддерживают их потенциальное применение в рецептурах противогрибковых препаратов и стимулируют дальнейшие исследования для идентификации активных соединений и выяснения их механизмов действия.

FOR CITATION: **Sakhraoui, A., Touati, N., Hihat, S., Madagh, B., Blanco, F.** (2026). Antimicrobial evaluation of the hydro-soluble extract from *Opuntia ficus-indica* seeds against bacterial and fungal pathogens. *Food Systems,* 9(2), 192–198. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2026-9-2-192-198

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: **Сахрауи, А., Туати, Н., Хихат, С., Мадаг, Б., Бландо, Ф.** (2026). Оценка антимикробных свойств водорастворимого экстракта из семян опунции индийской против бактериальных и грибковых патогенов. *Пищевые системы*, 9(2), 192–198. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2026-9-2-192-198

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Данная работа была финансирована Министерством высшего образования и научных исследований Алжира (грант на выполнение проекта PRFU № 00L01UN340120190001**).**

БЛАГОДАРНОСТИ: Авторы благодарны Доктору Мехуху Насреддину за помощь в выполнении данной работы.

1. Introduction

In recent years, the exploration of natural products for their antimicrobial properties has gained considerable attention in the fields of medicine, agriculture, and food preservation [1]. With the increasing concern over antibiotic resistance and the demand for safe and effective antimicrobial agents [2], researchers have turned to nature's vast arsenal of bioactive compounds. Alexandre et al. [3] highlighted the potential of natural products in crop protection and food preservation, emphasizing their role as eco-friendly alternatives to synthetic antimicrobials and their promising future applications. In addition, Abdel Fattahet al. [4] investigated the nutritive value and chemical composition of *Opuntia ficus-indica* seeds, demonstrating their richness in bioactive compounds that may contribute to the antimicrobial activity.

Opuntia ficus-indica, commonly known as prickly pear, has emerged as a promising natural resource due to its rich phytochemical composition and long-standing traditional uses [1]. Arba [5] emphasized the importance of plant-derived compounds as sustainable alternatives in food preservation and crop protection, highlighting their antimicrobial potential. Furthermore, Sakhraoui et al. [6] state that "it is a good source of bioactive compounds and may protect against human diseases. Moreover, cactus fruit juice positively affects the body's redox balance, and decreases oxidative lipid damage". In addition, Koubaa et al. [7] demonstrated that prickly pear seeds are rich in phenolic compounds exhibiting significant antioxidant and antibacterial activities.

Despite these findings, the antimicrobial potential of hydro-soluble extracts from *Opuntia ficus-indica* seeds remains insufficiently explored, particularly against both bacterial and fungal pathogens. This research describes the evaluation of the antimicrobial activity of hydro-soluble extracts derived from *Opuntia ficus-indica* seeds against selected pathogenic microorganisms.

Opuntia ficus-indica, a member of the Cactaceae family, is native to arid and semi-arid regions of the world [8]. Beyond its nutritional value, *Opuntia ficus-indica* is also recognized for the therapeutic potential of its different plant parts, including seeds and cladodes. Santos-Díaz et al. [9] and Zaghbib et al. [10] reported that *Opuntia* species contain bioactive compounds such as polyphenols, flavonoids, and betalains, which are associated with antioxidant and anti-inflammatory effects and may contribute to the prevention of chronic diseases. Similarly, El-Hawary et al. [11] identified volatile constituents in cladodes, fruit peel, and pulp with demonstrated antimicrobial activity against several pathogenic microorganisms. The seeds of *Opuntia ficus-indica* have garnered significant scientific interest due to their rich content of bioactive constituents. Silva et al. [12] reported that the seeds contain high levels of phenolic compounds and flavonoids, which contribute to strong antioxidant activity [13], as well as betalains known for their protective effects against oxidative stress and inflammation. In addition, in [14], authors highlighted the presence of essential fatty acids, particularly linoleic acid, which plays a key role in nutritional and health-promoting properties. Senouci-Bereksi et al. [15] furthermore characterized various *Opuntia ficus-indica* products and confirmed the presence of diverse phenolic compounds, flavonoids, and lipid fractions in the seeds, emphasizing their contribution to antioxidant capacity and potential antimicrobial activity. These compounds are well-documented for their various health-promoting properties, including antioxidant, anti-inflammatory, and anticancer activities [16,17]. Among these benefits, the antimicrobial potential of *Opuntia ficus-indica* extracts has emerged as a particularly noteworthy aspect. Historically, traditional medicine has recognized the antimicrobial efficacy of certain plant-derived substances, and advances in modern scientific methodologies have provided robust frameworks to validate and investigate these attributes further [18]. The global challenge posed by antibiotic resistance has intensified the search for natural antimicrobial agents, encouraging the exploration of plant-based alternatives to conventional therapies. Slimen et al. [19] provided a comprehensive review of the antimicrobial properties of *Opuntia ficus-indica,* highlighting the presence of bioactive compounds such as phenolics, flavonoids, and alkaloids that exhibit inhibitory effects against a wide range of pathogenic microorganisms. In addition, Koop et al. [20] discussed natural additives, particularly plant-derived pigments. Iftikhar et al. [21] emphasized that compounds such as betalains not only serve as natural colorants but also possess antioxidant and antimicrobial properties, making them valuable in food preservation. Furthermore, Castro et al. [22] demonstrated that extracts from yellow prickly pear peels are rich in bioactive compounds and exhibit significant antimicrobial activity against various microorganisms, supporting their potential application as natural preservatives.

This study focuses on the hydro-soluble extract obtained from *Opuntia ficus-indica* seeds and aims to evaluate its antimicrobial potential against a range of pathogenic bacteria and fungi. Plant-derived extracts have increasingly attracted scientific attention as alternative sources of bioactive compounds, particularly in response to the growing concerns regarding antimicrobial resistance and the excessive use of synthetic chemicals. In this context, gaining a deeper understanding of the antimicrobial properties of *Opuntia ficus-indica* seed extracts may provide valuable insights for several practical applications. These include the development of new natural antimicrobial agents, the improvement of food preservation strategies, and the promotion of more sustainable and environmentally friendly agricultural practices. Moreover, the valorization of plant by-products such as cactus seeds could represent an important step toward the sustainable use of natural resources.

The current study aims to methodically examine the antibacterial and antifungal properties of the hydro-soluble extract made from *Opuntia ficus-indica* seeds. The study evaluates the effect of this extract on different pathogenic microorganisms in order to determine its potential effectiveness as a natural antimicrobial source. Particular attention is also given to the influence of different concentration levels on microbial growth, allowing a more detailed assessment of the bioactivity of the extract. In addition, an attempt is made to discuss the possible mechanisms that may contribute to the observed antimicrobial effects, based on the interaction between the bioactive compounds present in the extract and microbial cells. Overall, the results obtained from this work may contribute to a better understanding of the antimicrobial potential of cactus seed extracts and may support future research aimed at developing natural, safe, and sustainable solutions for controlling microbial contamination in various fields, including food safety, agriculture, and public health.

2. Objects and methods

2.1. Sample preparation

The fruits were harvested in Hasnaoua, department of Bordj Bou Arreridj (Latitude: 36°15′44′81″S, Longitude: 4°79′13′85″W) towards the end of August 2020. The fruits were stripped of their thorns, washed and then peeled to recover the pulp, which is sprinkled with several small seeds that are stacked fairly evenly. The cohesion between the seeds is ensured by the mucilage and the fibers contained in the pulp. The fruits were then kneaded with an electric mixer SEB HT618 (SEB, France). The seeds from the pulp were cleaned and separated using water and sieve with increasingly reduced pores by rinsing abundantly with running water in order to be sure to eliminate all the mucilage. After that, the seeds were arranged in single layer on a plate and exposed to sunlight (with daily temperature of 30 °C) for about one day and then ground in an electrical grinder Type 108 N (SEB, France) to obtained powder, which was passed through standard 0.02 Um sieve and stored in airtight box until use.

2.2. Microwave-assisted extraction

A domestic microwave oven (CMW-A2602, Condor, Algeria) with cavity dimensions of 22.5 cm × 37.5 cm × 38.6 cm and 2450 kHz was used. The oven contained a digital control system for irradiation time and microwave power (the microwave was linearly adjustable from 100 to 1000W). The latter was modified in order to condensate the vapors generated during extraction into the sample. Different amounts of seed powder were placed in round bottom flasks of 250 mL (medium neck of 45 mm) containing water/ 80 % acetone). The extraction was carried out under 750 W and after 200 s. The sample extracts were separated by centrifugation using a centrifuge Universal 320 (Hettich, Germany) at 3000 rmp (SIGMA 3–30 ks) for 15 min. At the end, they were stored at 4 °C until use. A volume of 20 mL of a sample was passed through a rotary evaporator (model: R-210, type: rotary evaporator, Büchi, Switzerland) to evaporate the solvent. After 1 hour, the recovered sample was dried in an oven (Memmert, Germany) at 40 °C. After 24 hours the dry seed extract was obtained.

2.3. Antimicrobial activity

2.3.1. Antibacterial activity

The antibacterial potential of the *Opuntia ficus-indica* seed extracts was evaluated *in vitro* using the disc diffusion method. Sterile Whatman filter paper discs (6 mm in diameter) were used as the delivery vehicle for the extracts. Each disc was impregnated with a specific concentration of the *Opuntia ficus-indica* seed extract and subsequently placed onto the surface of Mueller-Hinton agar plates, which had been previously inoculated with the selected pathogenic bacterial strains. After incubation, the antibacterial activity was determined by measuring the diameter of the zones of inhibition (in mm) formed around each disc. These zones represent the area where bacterial growth was prevented by the diffusion of the extract [23]. The bacterial strains selected for this study are pathogenic bacteria (Table 1). These strains were provided to us by the microbiology and phytopathology laboratory at Mohamed El Bachir El Ibrahimi University (BBA). They were maintained by subculturing on nutrient agar medium (type: standard nutrient agar, Oxoid, UK) conducive to their growth in the dark for 24 hours at 37 °C.

Table 1. **Bacterial strains used and their pathogenic powers**
Таблица 1. **Использованные штаммы бактерий и их патогенность**

Strains	GRAM	Pathogenic power
Bacillus cereus	+	food poisoning due to food contamination (vegetable origin such as rice, spices)
Enterococcus faecalis	+	— Chronic intestinal inflammation — Bladder and prostate infections
Proteus mirabilis	–	— Urinary tract infections — Cysts and acute pyelonephritis
Salmonella typhimirium	–	— Typhoid fever — Gastroenteritis
Pseudomonas aeruginosa	–	— Septicemia, infant meningitis, surgical wound infections, gastroenteritis — Abdominal pain and bloody diarrhea
Escherichia coli	–	— Septicemia, infant meningitis, surgical wound infections, gastroenteritis — Abdominal pain and bloody diarrhea
Staphylococcus aureus	+	— Hospital-acquired infections — Abscesses, wound infections, septicemia, pneumonia, food poisoning — Potentially fatal infections in humans
Micrococcus luteus	+	— Bacteremia — Infections associated with ventricular shunts — Cases of abscesses and pneumonia

2.3.2. Antifungal activity

The antifungal activity of the dried extract was determined against five fungi: *Phytophthora infestans, Aspergillus parasiticus, Penicillium* sp., *Trichoderma* sp., *Fusarium* sp., and two yeasts: *Candida albicans, Candida glabrata.* These microorganisms were obtained from laboratory culture collections of the microbiology unit (Mohamed El Bachir El Ibrahimi University) and maintained under standard conditions prior to use. The selection of these strains was based on their relevance as common plant and food-contaminating fungi, as well as opportunistic human pathogens, and according to previous studies reported in the literature evaluating antimicrobial activity of plant extracts. This choice allows for a comprehensive assessment of the antifungal potential of the extract against a diverse range of microorganisms with agricultural, food, and clinical importance. The tested strains were used as model organisms to determine whether the extract exhibits inhibitory activity and to evaluate its spectrum of action.

2.4. Preparation of culture media and Opuntia ficus-indica (OFI) seed extract dilutions

Distilled water, test tubes used for the preparation of bacterial solutions, and Whatman filter paper disks (6 mm in diameter) wrapped in aluminum foil were sterilized in an autoclave Tuttnauer 2540 EL (Tuttnauer, Netherlands) at 121 °C/15 min.

The Mueller Hinton Agar medium was used to study the antibacterial activity because it is the most commonly used medium for antimicrobial susceptibility testing. Sabouraud agar and PDA medium were used for the isolation and maintenance of yeasts and fungi, as well as studying their sensitivity to the extracts.

The *OFI* seed extracts were dissolved. A stock solution of the acetone extract (110 mg/mL) was prepared and further diluted using a serial two-fold dilution method (Table 2). Dimethyl sulfoxide (DMSO) was used as the diluent to maintain a constant total volume of 400 uL for all concentrations (C1-C8). Pure DMSO (without extract) served as the negative control (C0) to ensure that the solvent did not interfere with bacterial growth. The solutions were prepared with agitation and refrigerated until use (Table 2).

Table 2. **Different concentrations of the acetone extract and corresponding DMSO (mg/ml)**
Таблица 2. **Различные концентрации ацетонового экстракта и соответствующий ДМСО (мг/мл)**

C	C0	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
ES	0	110	55	27.5	13.75	6.87	3.43	1.71	0.85
VOL	0	400	200	100	50	25	12.5	6.247	3.123
DMSO	400	0	200	300	350	375	387.5	393.753	396.877

Control (**C0**), extract concentrations (**C1-C8**), extract (**ES**), extract volume (**VOL**), and dimethyl sulfoxide (**DMSO**).

2.5. Evaluation of the antimicrobial potential

The antimicrobial potential of *Opuntia ficus-indica seed* extracts was evaluated using the disk diffusion method (Kirby-Bauer protocol) as recommended by the American Society for Microbiology (ASM) [24].

2.5.1. Standardization and preparation of the inoculum

After thawing the preserved microbial strains and allowing them to reach room temperature, well-isolated colonies were picked from young pre-cultures using a sterile platinum loop. The colonies were suspended in sterile saline solution (0.85% NaCl) and thoroughly homogenized using a Vortex-Genie 2 (Scientific Industries, Inc., Bohemia, NY, USA). The turbidity of the inoculum was standardized to the 0.5 McFarland standard by visual comparison and confirmed spectrophotometrically. Specifically, the optical density (OD) was measured at 625 nm using a UV-1800 spectrophotometer (Shimadzu, Japan). The suspension was adjusted until an OD value between 0.08 and 0.10 was reached, corresponding to approximately $1–2\times10^8$ CFU/mL for bacteria and $1–5\times10^6$ CFU/mL for yeasts and fungi.

2.5.2. Inoculation and disk application

Petri dishes containing Mueller-Hinton (MH) agar for bacteria, Potato Dextrose Agar (PDA) for fungi [25], or Sabouraud medium for yeasts were aseptically inoculated. A sterile swab was soaked in the standardized microbial suspension and streaked over the entire agar surface in a tight zigzag pattern. To ensure a confluent lawn of growth, this procedure was repeated three times, rotating the plate 60° each time, and finalized by swabbing the periphery of the medium [24]. Subsequently, a two-fold serial dilution was performed in sterile microtubes to obtain eight concentrations ranging from 110 mg/mL (C1) to 0.85 mg/mL (C8). Standardized 6 mm sterile filter paper disks were immersed in each concentration until complete saturation and placed onto the inoculated agar surface using sterile forceps.

2.5.3. Controls and incubation

A disk impregnated with pure DMSO (C0) was included in each assay as a negative control. In our study, DMSO exhibited no inhibitory effect against the tested strains, confirming the neutrality of the solvent. The plates were then incubated in a regulated incubator at 37 °C for 24 hours (bacteria) and at 25–28 °C for 48–72 hours (fungi and yeasts).

2.5.4. Interpretation

The interpretation was done by measuring the diameters of the inhibition zones in millimeters (mm) around the disks using a caliper. The results were expressed as the diameter of the inhibition zone and could be represented by symbols based on the sensitivity of the strains to the extracts.

The bacteria were classified into the following categories [23]:

- Non-sensitive (–) or resistant: diameter < 8 mm.
- Sensitive (+): diameter between 9 and 14 mm.
- Highly sensitive (++): diameter between 15 and 19 mm.
- Extremely sensitive (+++): diameter > 20 mm.

2.6. Statistical analysis

The results ($n=3$) were subjected to a two-factor analysis of variance. Mean values were compared using Fisher's test ($p<0.05$). All statistical analyses were carried out using Infostat®.

3. Results and discussion

3.1. Antimicrobial activity

The antibacterial and antifungal activities of the *OFI* seed extracts were estimated in terms of the diameter of the inhibition zone around the disks containing the extracts at various concentrations against pathogenic bacteria, molds and yeasts.

3.1.1 Antibacterial activity of hydro-soluble extract of OFI seeds

The following table (Table 3) presents the values in mm of the inhibition zones achieved with the studied strains.

Table 3. **Diameter of inhibition zones (in mm) of bacteria for the hydro-soluble extract of prickly pear seeds in the antimicrobial test**

Таблица 3. **Диаметр зон ингибирования (мм) бактерий для водорастворимого экстракта опунции индийской в анализе антимикробной активности**

Acetonic extract concentration	Gram	Diameters of inhibition zones							
		C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
Bacillus cereus	+	–	–	–	–	–	–	–	–
Enterococcus faecalis	+	15[a]	–	–	–	–	–	–	–
Micrococcus luteus	+	–	–	–	–	–	–	–	–
Pseudomonas aeruginosa	–	15[a]	14[b]	12[c]	–	–	–	–	–
Escherichia coli	–	14[a]	–	–	–	–	–	–	–
Proteus mirabilis	–	15[a]	14[b]	–	–	–	–	–	–
Salmonella typhimurium	–	–	–	–	–	–	–	–	–

The same letters in the same column refer to means that are not statistically different.

The results presented in Table 3 show the antibacterial activity of the hydro-soluble extract of *Opuntia ficus-indica* seeds against several bacterial strains. After 24 h of incubation at 37 °C, the extract did not exhibit any antibacterial activity against *Bacillus cereus*, *Micrococcus luteus*, or *Salmonella typhimurium* at any of the tested concentrations. These results indicate that the hydro-soluble extract of *Opuntia ficus-indica* seeds may have limited effectiveness against certain bacterial species.

However, the antibacterial activity was observed against some bacterial strains at higher concentrations. At a concentration of 110 mg/mL, the extract produced inhibition zones against *Escherichia coli* (14 mm), *Enterococcus faecalis* (15 mm), *Pseudomonas aeruginosa* (15 mm), and *Proteus mirabilis* (15 mm). In addition, *Pseudomonas aeruginosa* and *Proteus mirabilis* showed inhibition zones at lower concentrations as well, although the diameters decreased progressively with decreasing concentrations. These findings suggest that the antibacterial activity of the *OFI* seed extract is concentration-dependent, with stronger inhibition observed at higher extract concentrations [23].

These findings differ from those reported by Castro et al. [22], who found that prickly pear peels extracts had the antimicrobial activity against *Pseudomonas aeruginosa, Escherichia coli*, and *Micrococcus luteus*. Similarly, Temagoult et al. [26] also reported an inhibitory effect against *E. coli*. The differences observed between studies may be explained by several factors, including the plant part used, extraction solvent, extraction method, and the concentration of bioactive compounds present in the extract. According to Ciocan and Bara [27], the chemical structure of bioactive compounds, their type, and their concentration around microbial cells can influence their ability to penetrate the microbial membrane, which may lead to variations in microbial sensitivity to plant extracts.

Furthermore, Bandigari et al. [28] reported that the ethanolic extract of prickly pear exhibited the antimicrobial activity against *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli*, and *Lactobacillus* spp. at a concentration of 40 mg/mL. In contrast, in the present study the antibacterial activity was observed only at a higher concentration (110 mg/mL). This difference may be attributed to variations in the extraction solvent and method. While Bandigari et al. [28] used an ethanolic extract, the present study employed an acetonic extract, which may differ in the composition and concentration of bioactive compounds extracted from the plant material.

The antibacterial activity observed in this study may be associated with the presence of phenolic compounds, which are known for their antimicrobial properties [6]. Phenolic compounds can inhibit microbial growth by disrupting cell membranes, altering cell permeability, interfering with enzyme activity, and causing leakage of cellular components. However, the limited activity observed against some bacterial strains suggests that the effectiveness of the hydro-soluble *OFI* seed extract may depend on the susceptibility of the bacterial species as well as the concentration and composition of the bioactive compounds present in the extract.

The differences in the antibacterial activity observed among the tested bacterial strains may also be related to the structural differences between Gram-positive and Gram-negative bacteria [29]. The observed variations in susceptibility likely stem from the fundamental architectural differences in the bacterial cell walls [29]. While the thick peptidoglycan layer of Gram-positive strains generally allows for easier diffusion of plant metabolites, the complex outer membrane of Gram-negative bacteria — rich in lipopolysaccharides — serves as a robust permeability barrier. Interestingly, the total resistance exhibited by *Bacillus cereus* and *Micrococcus luteus* in this study suggests that Gram-status is not the sole determinant of sensitivity. Intrinsic resistance mechanisms, such as efflux pumps or specific enzymatic defenses, may further modulate the effectiveness of the *Opuntia ficus-indica* extract regardless of cell wall thickness. These findings highlight that the antibacterial efficacy of *Opuntia ficus-indica* seed extracts is not solely determined by Gram classification but also by the specific physiological and structural characteristics of each bacterial strain [19].

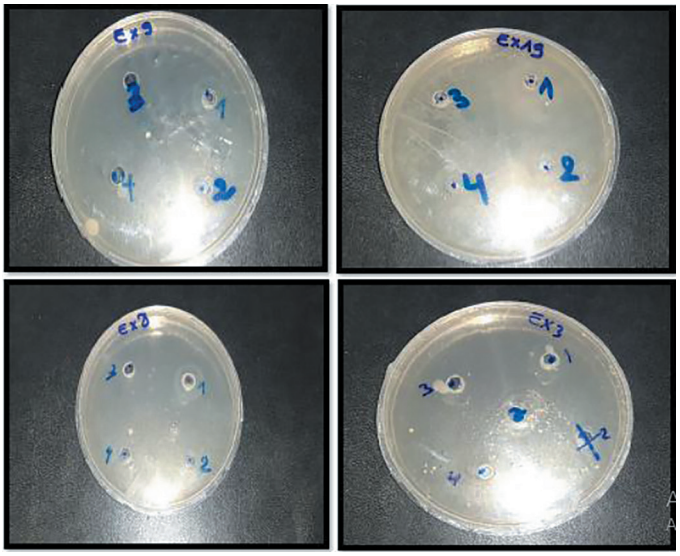


Figure 1. **Inhibition zones of the hydro-soluble extract for some bacteria (*Escherichia coli, Micrococcus luteus, Pseudomonas aeruginosa, Enterococcus faecalis*)**

Рисунок 1. **Зоны ингибирования роста некоторых бактерий (*Escherichia coli, Micrococcus luteus, Pseudomonas aeruginosa, Enterococcus faecalis*) под действием водорастворимого экстракта**

Figure 1 presents diameters of inhibition zones (in mm) of bacteria for the hydro-soluble extract of prickly pear seeds in the antimicrobial test.

According to the results presented in Figure 1, concentrations C2 (55 mg/mL; inhibition diameter = 14 mm) and C3 (27.5 mg/mL; inhibition diameter = 12 mm) exhibited the antibacterial activity against *Pseudomonas aeruginosa*. In addition, concentration C2 (diameter = 14 mm) showed inhibitory activity against *Proteus mirabilis*. These results suggest that the antibacterial activity of the hydro-soluble extract is concentration-dependent, with higher concentrations producing more pronounced inhibitory effects.

These findings are consistent with those reported by Aruwa et al. [30], who observed the antimicrobial activity against *Pseudomonas aeruginosa* and *Proteus mirabilis* using prickly pear fruit and peel extracts at different concentrations. The similarities between the results may indicate that various parts of the *Opuntia ficus-indica* plant contain bioactive compounds with antimicrobial potential. Therefore, prickly pear seed extracts may represent a promising natural source of antimicrobial agents, although their effectiveness appears to depend on the concentration and the bacterial strain tested.

However, our results differ from those reported by Özcan and Al Juhaimi [31], who investigated prickly pear seed extracts and found no antibacterial activity against *Escherichia coli, Pseudomonas aeruginosa*, and *Micrococcus luteus*. Such discrepancies between studies may be explained by differences in extraction methods, solvent polarity, plant origin, or environmental conditions affecting plant metabolism. According to Ramírez-Moreno et al. [32], variations in extraction procedures can significantly influence the chemical composition and biological activity of plant extracts.

Previous studies have demonstrated that the antimicrobial properties of plant extracts are largely attributed to secondary metabolites such as flavonoids, phenolic acids, and polyphenols [33]. These bioactive compounds can exert antibacterial effects through several mechanisms, including disruption of bacterial cell membranes, alteration of membrane permeability, inhibition of essential enzymes, and interference with nucleic acid synthesis. As reported by Iftikhar et al. [21], phenolic compounds can penetrate bacterial cell membranes and interact with intracellular targets, ultimately leading to bacterial growth inhibition or cell death.

According to the classification scale for antimicrobial activity, bacterial strains are considered resistant when the diameter of the inhibition zone is less than 10 mm [34]. Based on this criterion, the inhibition zones observed in the present study (12–15 mm) indicate that some bacterial strains were moderately sensitive to the hydro-soluble extract of *OFI* seeds. The antimicrobial activity observed may not be attributed to a single compound but rather to the synergistic interaction of several bioactive constituents present in the extract. Essawi et al. [35] reported that such synergistic effects among phytochemicals may enhance the overall antibacterial activity of plant extracts.

Furthermore, differences in bacterial susceptibility may also be associated with the structural characteristics of Gram-positive and Gram-negative bacteria. The antibacterial efficacy of the *Opuntia ficus-indica* seed extract was evident across both Gram-positive and Gram-negative classifications. Specifically, the extract successfully inhibited the growth of *Enterococcus faecalis*, *Escherichia coli*, and *Pseudomonas aeruginosa*. This suggests that the bioactive constituents within the hydro-soluble fraction possess a versatile mechanism of action capable of penetrating diverse cellular envelopes. Such broad-spectrum activity is significant, as it indicates that the functional compounds of the extract are not strictly limited by the structural barriers typically associated with different bacterial taxa [36].

Overall, these findings highlight the potential antimicrobial properties of *Opuntia ficus-indica* seed extracts and support their possible application as natural antibacterial agents.

However, their relatively limited antibacterial activity and variability depending on concentration indicate the need for further optimization and comprehensive investigation.

3.1.2 Antifungal activity of the hydro-soluble extract

The *in vitro* antifungal activity of various extracts from prickly pear seeds was investigated using the diffusion method. The table below (Table 4) presents the values in mm of the inhibition zones achieved with the studied strains.

Table 4. **Diameter of inhibition zones (mm) of the hydro-soluble extracts from prickly pear seeds against yeasts and fungi**

Таблица 4. **Диаметр зон ингибирования (мм) для водорастворимого экстракта опунции индийской против дрожжей и грибов**

Acetonic extract concentration	Diameters of inhibition zones							
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
Candida albicans	Very sensitive							
Candida glabrata	15[a]	–	–	–	–	–	–	–
Phytophthora infestans	9[a]	9[a]	9[a]	–	–	–	–	–
Aspergillus parasiticus	16[a]	–	–	–	–	–	–	–
Penicillium sp.	–	–	–	–	–	–	–	–
Trichoderma sp.	12[a]	10[b]	10[b]	10[b]	9[b]	9[b]	8[c]	
Fusarium sp.	9[a]	9[a]	–	–	–	–	–	–

The same letters in the same column refer to means that are not statistically different.

Table 4 presents the antifungal activity of the hydro-soluble extract of *Opuntia ficus-indica* seeds against several fungal and yeast strains. The results indicate that the extract exhibited inhibitory activity against most of the tested microorganisms, except for *Penicillium* sp., which showed no sensitivity at any of the tested concentrations. The observed inhibition zones were 9 mm for *Phytophthora infestans*, 16 mm for *Aspergillus parasiticus*, 12 mm for *Trichoderma* sp., and 9 mm for *Fusarium* sp. These results indicate that the extract possesses moderate antifungal activity against certain filamentous fungi.

According to the classification scale proposed by Mutaiet al. [37], fungal strains are considered sensitive to antimicrobial agents when the inhibition zone diameter ranges between 9 and 19 mm. Based on this criterion, the fungal strains tested in this study can be considered sensitive to the hydro-soluble extract of *Opuntia ficus-indica* seeds, particularly *Aspergillus parasiticus*, which showed the largest inhibition zone (16 mm). The antifungal activity observed may be attributed to the presence of bioactive phytochemicals capable of inhibiting fungal growth.

Regarding yeasts, the extract demonstrated strong inhibitory activity against both tested strains. *Candida albicans* was particularly sensitive to the extract, with an inhibition diameter exceeding 20 mm, while *Candida glabrata* exhibited an inhibition zone of 15 mm at the highest concentration tested. These findings suggest that the hydro-soluble extract of *OFI* seeds may possess promising antifungal properties against pathogenic yeasts. The inhibition zones observed also indicate that the antifungal effect may be concentration-dependent, with higher concentrations of the extract resulting in stronger inhibitory activity.

The antifungal activity observed in this study may be associated with the presence of secondary metabolites such as flavonoids, phenolic acids, and polyphenols in the plant extract. These compounds are known to possess strong antimicrobial properties and may exert their effects through different mechanisms. According to Elkady et al. [38], phenolic compounds can penetrate fungal cell membranes and interact with essential intracellular components such as enzymes, proteins, and nucleic acids. This interaction may disrupt important cellular processes, leading to the inhibition of fungal growth or cell death.

Furthermore, differences in sensitivity among fungal species may be related to variations in their cellular structure and metabolic characteristics. Fungal cell walls are mainly composed of chitin, glucans, and other polysaccharides, which may influence the permeability of antifungal compounds. Some fungal species possess more effective defense mechanisms, such as detoxification enzymes or efflux pumps, which may reduce their susceptibility to plant-derived antimicrobial compounds. This may explain the lack of activity observed against *Penicillium* sp. in the present study.

In addition, the antifungal activity of plant extracts is often attributed to the synergistic effects of multiple bioactive compounds [39], rather than a single active constituent. The interaction between different phenolic compounds, flavonoids, and other secondary metabolites may enhance the overall antimicrobial activity of the extract [40]. Such synergistic interactions can increase the ability of plant extracts to disrupt fungal cell structures and inhibit microbial growth [41].

Overall, the results obtained in this study highlight the potential antifungal properties of the hydro-soluble extract derived from *Opuntia ficus-indica* seeds against several pathogenic fungi and yeasts. The observed inhibitory effects suggest that compounds naturally present in prickly pear seeds may contribute to limiting the growth of certain microorganisms of medical and agricultural importance. These findings reinforce the growing interest in plant-based resources as possible alternatives to synthetic antifungal agents, particularly in the context of increasing microbial resistance and environmental concerns related to chemical preservatives. In addition, the valorization of cactus seed by-products could represent a sustainable approach for the development of natural antimicrobial substances with potential applications in food preservation, agriculture, and public health.

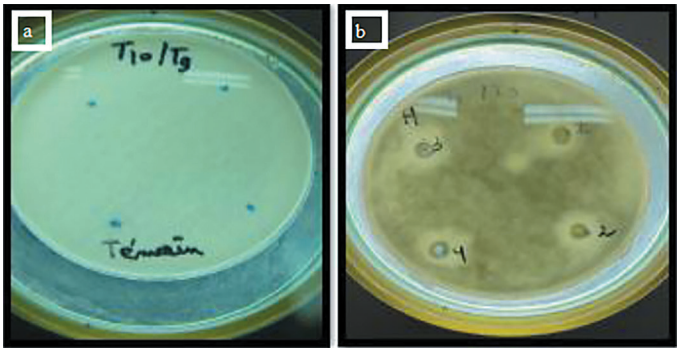


Figure 2. **Effect of water-soluble extract on *Trichoderma* sp.: (a) control; (b) inhibition zone**

Рисунок 2. **Влияние водорастворимого экстракта на *Trichoderma* sp.: (a) контроль; (b) зона ингибирования**

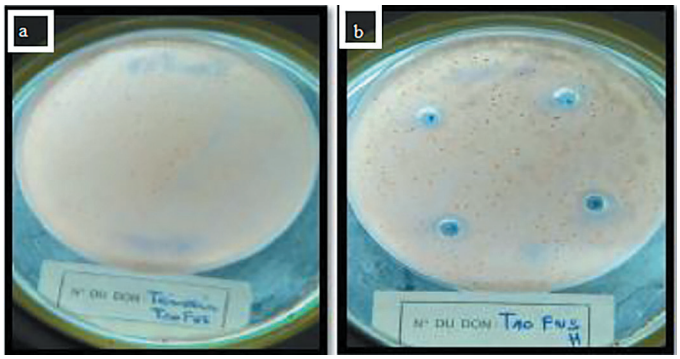


Figure 3. **Effect of water-soluble extract on *Fusarium* sp.: (a) control; (b) inhibition zone**

Рисунок 3. **Влияние водорастворимого экстракта на *Fusarium* sp.: (a) контроль; (b) зона ингибирования**

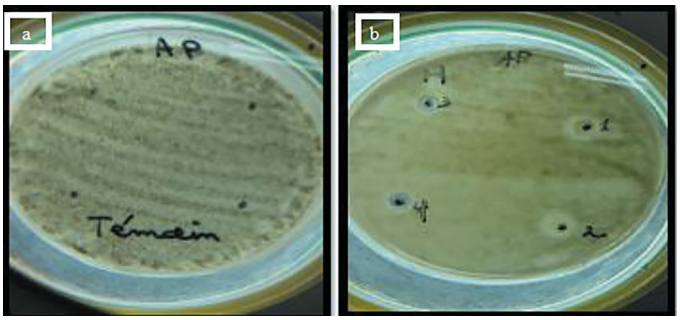


Figure 4. **Effect of water-soluble extract on *Aspergillus parasiticus*: (a) control; (b) inhibition zone**

Рисунок 4. **Влияние водорастворимого экстракта на *Aspergillus parasiticus*: (a) контроль; (b) зона ингибирования**

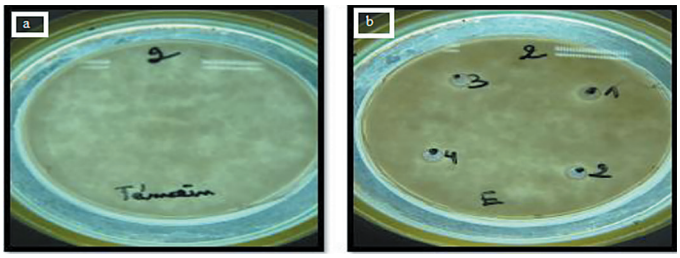


Figure 5. **Effect of water-soluble extract on *Phytophthora infestans*: (a) control; (b) inhibition zone**

Рисунок 5. **Влияние водорастворимого экстракта на *Phytophthora infestans*: (a) контроль; (b) зона ингибирования**

Figures 2 to 5 present the diameters of inhibition zones (mm) produced by the hydro-soluble extracts of *Opuntia ficus-indica* seeds against the tested yeasts and fungi. These figures illustrate the antifungal activity observed during the experiments and allow a clearer comparison of the sensitivity of the different microbial strains. Overall, the results indicate a variable response depending on the microorganism and the concentration of the extract. Some strains exhibited pronounced inhibition zones, reflecting a higher sensitivity to the extract, while others showed reduced or no inhibition, suggesting a lower susceptibility. In particular, yeasts such as *Candida albicans* and *Candida glabrata* demonstrated noticeable sensitivity, whereas certain filamentous fungi displayed more resistance. Furthermore, an increase in extract concentration generally resulted in larger inhibition zones, indicating a dose-dependent effect. These observations highlight the selective antifungal potential of the extract and suggest that its bioactive compounds may act more effectively against specific fungal groups.

4. Conclusion

The hydro-soluble extract obtained from the seeds of *Opuntia ficus-indica* demonstrated noticeable antimicrobial activity against several tested microorganisms, including certain bacterial and fungal species. The results indicate that the inhibitory effect of the extract tends to increase with concentration, suggesting a clear dose-dependent relationship between the amount of extract applied and the level of microbial growth suppression observed during the experiments. Such behavior may be associated with the presence of various bioactive compounds naturally occurring in prickly pear seeds, which are known to contain phenolic substances and other metabolites with potential antimicrobial properties. These findings highlight the interest in *Opuntia ficus-indica* as a valuable natural resource for the exploration of new antibacterial and antifungal substances. In recent years, plant-derived compounds have attracted increasing attention as researchers seek safer and more sustainable alternatives to synthetic antimicrobial agents. In this context, the prickly pear cactus, which is widely distributed in arid and semi-arid regions, represents an accessible and promising source of biologically active molecules. Moreover, the growing global concern related to antibiotic resistance has intensified the search for new antimicrobial strategies capable of limiting the spread of resistant pathogens. Investigating natural products such as extracts obtained from *Opuntia ficus-indica* seeds may therefore contribute to the development of innovative and environmentally friendly antimicrobial solutions. Further studies focusing on the identification of the active constituents and the evaluation of their biological mechanisms would provide deeper insight into the therapeutic and technological potential of this plant resource.

REFERENCES

1. Ogunnupebi, T.A., Oluyori, A.P., Dada, A.O., Oladeji, O.S., Adejumoke, A., Inyinbor, A.A., Egharevba, G.O. (2020). Promising natural products in crop protection and food preservation: Basis, advances, and future prospects. *International Journal of Agronomy,* 2020(66), Article 8840046. https://doi.org/10.1155/2020/8840046
2. Ansari, Z., Goomer, S. (2022). Natural gums and carbohydrate-based polymers: Potential encapsulants. *Indo Global Journal of Pharmaceutical Sciences,* 12, 1–20. https://doi.org/10.35652/IGJPS.2022.12001
3. Alexandre, E.M.C., Coelho, M.C., Ozcan, K., Pinto, C.A., Teixeira, J.A., Saraiva, J.A. et al. (2021). Emergent technologies for the extraction of antioxidants from prickly pear peel and their antimicrobial activity. *Foods,* 10(3), Article 570. https://doi.org/10.3390/foods10030570
4. Abdel Fattah, M.S., Badr, S.E., Elsaid, A.S. (2020). Nutritive value and chemical composition of prickly pear seeds (*Opuntia ficus indica* L.) growing in Egypt. *International Journal of Agricultural Policy and Research*, 62(5), 533–536. https://doi.org/10.3109/09637486.2011.552569
5. Arba, M. (December 31, 2006). *"Dellahia" a cactus pear cultivar from the Mediterranean coast of northern Morocco.* V International Congress on Cactus Pear and Cochineal. ISHS Acta Horticulturae. Chapingo, Mexico, 2006. https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2006.728.3
6. Sakhraoui, A., Touati, N., Hihat, S. (2023). Effect of time and temperature storage on the quality of unpasteurized prickly pear juice enriched with hydro-soluble *Opuntia ficus indica* seeds extract. *Turkish Journal of Agriculture — Food Science and Technology,* 11(10), 1817–1824. https://doi.org/10.24925/turjaf.v11i10.1817-1824.5968
7. Koubaa, M., Mhemdi, H., Barba, F.J., Angelotti, A., Bouaziz, F., Chaabouni, S.E. et al. (2017). Seed oil extraction from red prickly pear using hexane and supercritical CO_2: Assessment of phenolic compound composition, antioxidant and antibacterial activities. *Journal of the Science of Food and Agriculture,* 97(2), 613–620. https://doi.org/10.1002/jsfa.7774
8. El-Sayed, S.A.H., Nagaty, A.M., Salman, M.S., Bazaid, S.A. (2014). Phytochemicals, nutritionals and antioxidant properties of two prickly pear cactus cultivars (*Opuntia ficus indica*Mill.) growing in Taif, KSA. *Food Chemistry*, 160, 31–38. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.03.060
9. Santos-Díaz, M.S., de la Rosa, A.B., Héliès-Toussaint, C., Guéraud, F., Nègre-Salvayre, A. (2017). *Opuntia* spp.: Characterization and benefits in chronic diseases. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*, 2017, Article 8634249. https://doi.org/10.1155/2017/8634249
10. Zeghbib, W., Boudjouan, F., Vasconcelos, V., Lopes, G. (2022). Phenolic compounds' occurrence in *Opuntia* species and their role in the inflammatory process: A review. *Molecules*, 27(15), Article 4763. https://doi.org/10.3390/molecules27154763
11. El-Hawary, S.S., El-Tantawy, M.E., Rabeh, M.A., Badr, W.K. (2021). Chemical composition and antimicrobial activity of volatile constituents of cladodes, fruits peel and fruits pulp from *Opuntia ficus indica* (L,) Mill (Prickly Pear) growing in Egypt. *Egyptian Journal of Chemistry* 64(1), 437–444. https://doi.org/10.21608/ejchem.2020.21137.2260
12. Silva, M.A., Albuquerque, T.G., Pereira, P., Ramalho, R., Vicente, F., Oliveira, M.B.P.P. (2021). *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill.: A multi-benefit potential to be exploited. *Molecules*, 26(4), Article 95. https://doi.org/10.3390/molecules26040951
13. Albergamo, A., Potortí, G.A., Di Bella, G., Ben Amor, N.B., Lo Vecchio, G., Nava, V. et al. (2022). Chemical characterization of different products from the Tunisian *Opuntia ficus-indica*. *Foods,* 11(2), Article 155. https://doi.org/10.3390/foods11020155
14. Touati, N., Sakhraoui, A., Hihat, S., Blando, F. (2025). Phytochemicals, antioxidant properties and anti-inflammatory capacity of hydro-soluble seed extract of *Opuntia ficus-indica*. *Egyptian Journal of Botany*, 65(2), 241–248. https://doi.org/10.21608/ejbo.2024.286760.2829
15. Senouci-Bereksi, M., Khadir, A. (2025). A review on antimicrobial properties of prickly pear cactus *Opuntia ficus-indica*: An update. *The Natural Products Journal*, 15(6), Article e030724231556. https://doi.org/10.2174/0122103155320334240626075057
16. Fratianni, F., Coppola, F., Tavaniello, S., Ombra, M.N., De Giulio, B., D'Agostino, N. et al. (2025). Fatty acid profile and biological aspects of borage, calophyllum, and prickly pear seed oils: Implications for health and dietary use. *Antioxidants*, 14(6), Article 661. https://doi.org/10.3390/antiox14060661
17. Gouws, C., Mortazavi, R., Mellor, D., McKune, A., Naumovski, N. (2020). The effects of prickly pear fruit and cladode (*Opuntia spp.*) consumption on blood lipids: A systematic review. *Complementary Therapies in Medicine,* 50, Article 102384. https://doi.org/10.1016/j.ctim.2020.102384
18. Hika, W.M., Said-Al Ahl, H.A.H., Kačániová, M. (2021). A review of antimicrobial activities of cactus (*Opuntia ficus-indica*). *Asian Journal of Research in Biosciences*, 3(3), 10–17.
19. Slimen, I.B., Najar, T., Abderrabba, M. (2021). Bioactive compounds of prickly pear (*Opuntia ficus-indica*). Chapter in a book: Bioactive Compounds in Underutilized Vegetables and Legumes. Springer, Cham, 2021. https://doi.org/10.1007/978-3-030-44578-2_12-2
20. Koop, B.L., Maciel, A.G., Soares, L.S., Monteiro, A.R., Valencia, G.A. (2023). Natural colorants. Chapter in a book: Natural Additives in Foods. Springer, Cham, 2023. https://doi.org/10.1007/978-3-031-17346-2_4
21. Iftikhar, K., Siddique, F., Ameer, K., Arshad, M., Kharal, S., Ahmed, I.A.M. et al. (2023). Phytochemical profiling, antimicrobial and antioxidant activities of hydroethanolic extracts of prickly pear (*Opuntia ficus indica*) fruit and pulp. *Food Science and Nutrition,* 11(4), 1916–1930. https://doi.org/10.1002/fsn3.3226

22. 22.Castro, L.M.G., Alexandre, E.M.C., Pintado, M., Saraiva, J.A. (2019). Bioactive compounds and antimicrobial activity of yellow prickly pear peels. *International Journal of Food Science and Technology*, 54(4), 1225–1231. https://doi.org/10.1111/ijfs.14075
23. Mouas, Y., Benrebiha, F.Z., Chaouia, C. (2017). Evaluation of the antibacterial activity of the essential oil and the methanolic extract of the *Rosem ary Rosmarinus officinalis* L. *Revue Agrobiologia*, 7(1), 363–370.
24. Hudzicki, J. (2009). Kirby-Bauer disk diffusion susceptibility test protocol. American Society for Microbiology, 2008. Retrieved from https://asm.org/getattachment/2594ce26-bd44-47f6-8287-0657aa9185ad/kirby-bauer-disk-diffusion-susceptibility-test-protocol-pdf.pdf Accessed April 25, 2026
25. Athamena, S., Chalghem, I., Kassah-Laouar, A., Laroui, S., Khebri, S. (2010). Antioxidant and antimicrobial activity of extracts of *Cuminum cyminum*. *Lebanese Science Journal*, 11(1), 69–81.
26. Temagoult, A., Noui, Y., Zitouni, B. (2023). Antimicrobial and antioxidant activities of Algerian prickly pears and two cultivars dates (Mech-Degla and Frezza). *Food and Health*, 9(3), 230–241. https://doi.org/10.3153/FH23021
27. Ciocan, I. D., Bara, I, I. (2007). Plant products as antimicrobial agents. *Analele Ştiinţifice ale Universităţii „Alexandru Ioan Cuza”,* 8, 151–156.
28. Bandigari, P., Alapati, S., Kamatam, P., Parelli, K., Chinnala, K.M. (2020). Phytochemical investigation and evaluation of antimicrobial activity of ethanolic fruit extract of prickly pear. *International Journal of Research and Analytical Reviews*, 7(3), 947–952.
29. Ruhal, R., Kataria, R. (2021). Biofilm patterns in gram-positive and gram-negative bacteria. *Microbiological Research,* 251, Article 126829. https://doi.org/10.1016/j.micres.2021.126829
30. Aruwa, C.E., Amoo, S., Kudanga, T. (2019). Phenolic compound profile and biological activities of Southern African *Opuntia ficus-indica*. *LWT,* 111, 337–344. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.05.028
31. 31.Özcan, M. M., Al Juhaimi, F. Y. (2011). Nutritive value and chemical composition of prickly pear seeds (*Opuntia ficus indica* L.) growing in Turkey. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 62(5), 533–536. https://doi.org/10.3109/09637486.2011.552569
32. Ramírez-Moreno, E., Cariño-Cortés, R., Cruz-Cansino, N. del S., Delgado-Olivares, L., Ariza-Ortega, A.J., Montañez-Izquierdo, Y.V. (2017). Antioxidant and antimicrobial properties of cactus pear (*Opuntia*) seed oils. *Journal of Food Quality*, 2017, Article 3075907. https://doi.org/10.1155/2017/3075907
33. Cristani, M., D'Arrigo, M., Mandalari, G., Castelli, F., Sarpietro, M.G., Micieli, D. et al. (2007). Interaction of four monoterpenes contained in essential oils with model membranes: Implications for their antibacterial activity. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 55(15), 6300–6308. https://doi.org/10.1021/jf070094x
34. Koohsari, H., Ghaemi, E.A., Sheshpoli, M.S., Jahedi, M., Zahiri, M. (2015). Investigation of antibacterial activity of selected native plants from North of Iran. *Journal of Medicine and Life,* 8(Spec. Iss, 2), 38–42.
35. Essawi, T., Srour, M. (2000). Screening of some Palestinian medicinal plants for antibacterial activity. *Journal of Ethnopharmacology,* 70(3), 343–349. https://doi.org/10.1016/S0378-8741(99)00187-7
36. Turkmen, N., Velioglu, Y.S., Sari, F., Polat, G. (2007). Effect of extraction conditions on measured total polyphenol contents and antibacterial activities of black tea. *Molecules,* 12(3), 484–496. https://doi.org/10.3390/12030484
37. Mutai, C., Bii, C., Vagias, C., Abatis, D., Roussis, V. (2009). Antimicrobial activity of *Acacia mellifera* extracts and lupane triterpenes. *Journal of Ethnopharmacology* 123(1), 143–148. https://doi.org/10.1016/j.jep.2009.02.007
38. Elkady, W.M., Raafat, M.M., Abdel-Aziz, M.M., Al-Huqail, A.A., Ashour, M.L., Fathallah, N. (2022). Endophytic fungus from *Opuntia ficus-indica*: A source of antimicrobial compounds against multidrug-resistant bacteria. *Plants,* 11(8), Article 1070. https://doi.org/10.3390/plants11081070
39. Amenu, D. (2014). Antimicrobial activity of medicinal plant extracts and their synergistic effect on selected pathogens. *American Journal of Ethnomedicine,* 1(1), 18–29.
40. Ahlawat, Y.K., Singh, M., Manorama, K., Lakra, N., Zaid, A., Zulfiqar, F. (2024). Plant phenolics: Neglected secondary metabolites in plant stress tolerance. *Brazilian Journal of Botany*, 47(3), 703–721. https://doi.org/10.1007/s40415-023-00949-x
41. Bonincontro, G., Scuderi, S.A., Marino, A., Simonetti, G. (2023). Synergistic effect of plant compounds with conventional antimicrobials against biofilm of *Staphylococcus aureus*, *Pseudomonas aeruginosa*, and *Candida* spp. *Pharmaceuticals*, 16(11), Article 1531. https://doi.org/10.3390/ph16111531

AUTHOR INFORMATION	СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ
Affiliation	**Принадлежность к организации**
Amira Sakhraoui, PhD Food Sciences, Laboratory of Characterization and Valorization of Natural Resources, Department of Food Sciences, Faculty of Life and Natural Sciences and Earth and Universe, University Mohamed El Bachir El Ibrahimi of Bordj Bou Arreridj El-Anasser Bordj Bou Arreridj 34030 Bordj Bou Arreridj, Algeria E-mail: amira.sakhraoui@univ-bba.dz ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8152-2107	**Сахрауи Амира** — PhD, Лаборатория характеристики и оценки природных ресурсов, кафедра пищевых наук, факультет биологии и естественных наук, Земли и Вселенной, Университет Мохаммеда Эль-Бахира Эль-Ибрахими в Бордж-Бу-Арреридже Эль-АнассерБордж-Бу-Арреридж, 34030 Бордж-бу-Арреридж, Алжир E-mail: amira.sakhraoui@univ-bba.dz ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8152-2107
Noureddine Touati, PhD Food Sciences, Associate Professor, Laboratory of Health and Environment, Department of Food Sciences, Faculty of Life and Natural Sciences and Earth and Universe, University Mohamed El Bachir El Ibrahimi of Bordj Bou Arreridj El-Anasser Bordj Bou Arreridj 34030 Bordj Bou Arreridj Algeria E-mail: n.touati@univ-bba.dz ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1110-6770 * corresponding author	**Туати Нуреддин** — PhD, адъюнкт-профессор, Лаборатория охраны здоровья и окружающей среды, кафедра пищевых наук, факультет биологии и естественных наук, Земли и Вселенной, Университет Мохаммеда Эль-Бахира Эль-Ибрахими в Бордж-Бу-Арреридже Эль-АнассерБордж-Бу-Арреридж, 34030 Бордж-бу-Арреридж, Алжир E-mail: n.touati@univ-bba.dz ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1110-6770 * автор для контактов
Soraya Hihat, PhD Food Sciences, Associate Professor, Department of Food Sciences, Faculty of Life and Natural Sciences and Earth and Universe, University Mohamed El Bachir El Ibrahimi of Bordj Bou Arreridj El-Anasser Bordj Bou Arreridj 34030 Bordj Bou Arreridj Algeria E-mail: soraya.hihat@univ-bba.dz ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3377-7866	**Хихат Сорайя** — PhD, адъюнкт-профессор, кафедра пищевых наук, факультет биологии и естественных наук, Земли и Вселенной, Университет Мохаммеда Эль-Бахира Эль-Ибрахими в Бордж-Бу-Арреридже Эль-АнассерБордж-Бу-Арреридж, 34030 Бордж-бу-Арреридж, Алжир E-mail: soraya.hihat@univ-bba.dz ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3377-7866
Bilal Madagh, PhD Student Food Sciences, Laboratory of Health and Environment, Department of Food Sciences, Faculty of Life and Natural Sciences and Earth and Universe, University Mohamed El Bachir El Ibrahimi of Bordj Bou Arreridj El-Anasser Bordj Bou Arreridj 34030 Bordj Bou Arreridj Algeria E-mail: bilal.madagh@univ-bba.dz ORCID: https://orcid.org/0009-0003-1253-7753	**Мадаг Билал** — студент, Лаборатория охраны здоровья и окружающей среды, кафедра пищевых наук, факультет биологии и естественных наук, Земли и Вселенной, Университет Мохаммеда Эль-Бахира Эль-Ибрахими в Бордж-Бу-Арреридже Эль-АнассерБордж-Бу-Арреридж, 34030 Бордж-бу-Арреридж, Алжир E-mail: bilal.madagh@univ-bba.dz ORCID: https://orcid.org/0009-0003-1253-7753
Federica Blando, Associate Professor, Research Unit of Lecce, Institute of Sciences of Food Production (ISPA), National Research Council (CNR) Via Provinciale Lecce-Monteroni — 73100 Lecce (LE) — Puglia, Italy E-mail: federica.blando@cnr.it ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6372-8889	**Бландо Федерика** –адъюнкт-профессор, Исследовательское подразделение в Лечче, Институт наук о производстве пищевых продуктов (ISPA), Национальный исследовательский совет (CNR), ул. Лечче-Монтерони, 73100 Лечче, Пулия, Италия E-mail: federica.blando@cnr.it ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6372-8889
Contribution	**Критерии авторства**
All authors bear responsibility for the work and presented data. **Amira Sakhraoui**: Study design, Data collection, Data analysis, Writing the manuscript. **Noureddine Touati**: Supervising the work, Data analysis, review and editing. **Soraya Hihat**: Study design, Data collection, Data analysis, Writing the manuscript. **Bilal Madagh**: review and editing. **Federica Blando**: Data analysis, review and editing. The authors were equally involved in writing the manuscript and bear the equal responsibility for plagiarism.	Все авторы несут ответственность за работу и представленные данные. **Амира Сахрауи**: Разработка проекта исследования, сбор и анализ данных, написание рукописи. **Нуреддин Туати**: Руководство работой, анализ данных, рецензирование и редактирование. **Сорайя Хихат**: Разработка проекта исследования, сбор данных, их анализ, написание рукописи. **Билал Мадаг**: рецензирование и редактирование. **Федерика Бландо**: Анализ, рецензирование и редактирование данных. Авторы в равных долях имеют отношение к написанию рукописи и одинаково несут ответственность за плагиат.
Conflict of interest	**Конфликт интересов**
The authors declare no conflict of interest.	Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

DOI: https://doi.org/10.21323/2618-9771-2026-9-2-199-207

Поступила 05.02.2026
Поступила после рецензирования 30.04.2026
Принята в печать 05.05.2026
© Свириденко Г. М., Захарова М. Б., Мамыкин Д. С., 2026

https://www.fsjour.com/jour
Научная статья
Открытый доступ

РИСКИ СНИЖЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ПРОДУКТОВ СЫРОДЕЛИЯ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СОСТАВА АНТИБИОТИКОВ В МОЛОКЕ

Свириденко Г. М., Захарова М. Б., Мамыкин Д. С.*

Всероссийский научно-исследовательский институт маслоделия и сыроделия, Углич, Ярославская область, Россия

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:
молоко-сырье, сыр, сыворотка, лекарственные препараты, технологические риски, безопасность продукции

АННОТАЦИЯ

Исследование направлено на оценку рисков снижения безопасности полутвердых и мягких сыров при переработке молока, содержащего остаточные количества антибиотиков. Методом модельных выработок изучено влияние шести классов антибиотиков на развитие заквасочной микрофлоры и их распределение между сырным тестом и подсырной сывороткой в технологиях голландского и адыгейского сыров. В целях информативности результатов анализов количество внесенных антибиотиков существенно превышало нормированный уровень в сыром молоке: ампициллин — 35,0 мкг/кг; тетрациклин — 250,0 мкг/кг; хлортетрациклин — 250,0 мкг/кг; доксситетрациклин — 250,0 мкг/кг; стрептомицин — 4000,0 мкг/кг; ципрофлоксацин — 50,0 мкг/кг; эритромицин — 2500,0 мкг/кг; левомицетин — 200,0 мкг/кг. Установлено, что ампициллин оказывает наиболее выраженное бактерицидное действие, приводя к критическому подавлению заквасочного микробиома. Стрептомицин, эритромицин и тетрациклин проявляют умеренное ингибирование, тогда как ципрофлоксацин и левомицетин не оказывают значимого влияния на заквасочные культуры. Анализ долевого распределения антибиотиков различных групп показал, что большинство изученных антибиотиков преимущественно переходят в сыворотку (на уровне 85–89 %), что соответствует массовому распределению сыворотка–сыр. Исключением является тетрациклин, до 35 % которого переходит в сырную массу. Одним из определяющих факторов для конечного содержания антибиотиков отмечен тип сыра. В сыре Голландский 50–55 % антибиотиков тетрациклиновой группы (тетрациклин, хлортетрациклин, доксситетрациклин) накапливаются в сырном тесте, создавая прямую угрозу для потребителя, а в сыре Адыгейский 81–88 % исследованных антибиотиков переходит в сыворотку, что снижает нагрузку на сыр, но приводит к загрязнению побочного продукта и создает проблему вторичной переработки сыворотки. Полученные экспериментальные данные подчеркивают необходимость учета не только исходной концентрации антибиотиков в молоке, но и их природы и технологических параметров производства сыров при разработке систем управления их безопасностью.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Статья подготовлена в рамках выполнения исследований по государственному заданию № FGUS-2024-0008 Федерального научного центра пищевых систем им. В. М. Горбатова Российской академии наук

БЛАГОДАРНОСТИ: Авторы выражают благодарность ООО «Юниверс Диагностикс» за поддержку в проведении исследований, а также Научно-исследовательскому испытательному центру ФГБНУ «ФНЦ пищевых систем им. В. М. Горбатова» РАН (НИИЦ) и лично Иванову Алексею Антоновичу, инженеру-исследователю НИИЦ, за выполнение аналитических исследований по количественному определению антибиотиков в экспериментальных образцах.

Received 05.02.2026
Accepted in revised 30.04.2026
Accepted for publication 05.05.2026
© Sviridenko G. M., Zakharova M. B., Mamykin D. S., 2026

Available online at https://www.fsjour.com/jour
Original scientific article
Open access

RISKS OF REDUCING SAFETY OF CHEESE-MAKING PRODUCTS DEPENDING ON THE COMPOSITION OF ANTIBIOTICS IN MILK

Galina M. Sviridenko, Marina B. Zakharova, Denis S. Mamykin*

All-Russian Scientific Research Institute of Butter- and Cheesemaking, Uglich, Yaroslavl Region, Russia

KEYWORDS:
raw milk, cheese, whey, medicinal products, technological risks, product safety

ABSTRACT

The study is aimed at assessing risks of reducing the safety of semi-hard and soft cheeses during processing of milk containing residual amounts of antibiotics. Using the method of model production, the effect of six classes of antibiotics on the development of starter microflora and their distribution between the cheese dough and cheese whey in the technologies of Gollandsky and Adygeysky cheeses was studied. In order to make the analysis results informative, the amount of added antibiotics significantly exceeded the level standardized in raw milk: ampicillin — 35.0 mcg/kg; tetracycline — 250.0 mcg/kg; chlortetracycline — 250.0 mcg/kg; doxytetracycline — 250.0 mcg/kg; streptomycin — 4000.0 mcg/kg; ciprofloxacin — 50.0 mcg/kg; erythromycin — 2500.0 mcg/kg; chloramphenicol — 200.0 mcg/kg. Ampicillin was found to have the most pronounced bactericidal effect, leading to critical suppression of the starter microbiome. Streptomycin, erythromycin, and tetracycline exhibit moderate inhibition, while ciprofloxacin and chloramphenicol have no significant effect on starter cultures. Analysis of the proportional distribution of antibiotics from various groups showed that most of the studied antibiotics are predominantly transferred to the whey (at a level of 85–89 %), which corresponds to the whey-cheese mass distribution. The exception is tetracycline, up to 35 % of which is transferred to the cheese mass. The type of cheese is noted to be one of the determining factors for the final antibiotic content. In Gollandsky cheese, 50–55 % of tetracycline antibiotics (tetracycline, chlortetracycline, and doxytetracycline) accumulate in the cheese dough, posing a direct threat to consumers. In Adygeysky cheese, 81–88 % of the studied antibiotics migrate into the whey, which reduces the load on the cheese but leads to by-product contamination and poses a problem for whey recycling. The experimental data obtained highlight the need to consider not only the initial concentration of antibiotics in milk, but also their nature and the process parameters of cheese production when developing cheese safety management systems.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: **Свириденко, Г. М., Захарова, М. Б., Мамыкин, Д. С.** (2026). Риски снижения безопасности продуктов сыроделия в зависимости от состава антибиотиков в молоке. *Пищевые системы*, 9(2), 199–207. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2026-9-2-199-207

FOR CITATION: **Sviridenko, G. M., Zakharova, M. B., Mamykin, D. S.** (2026). Risks of reducing safety of cheese-making products depending on the composition of antibiotics in milk. *Food Systems,* 9(2), 199–207. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2026-9-2-199-207

FUNDING: The article was prepared as part of research carried out on a government assignment No. FGUS-2024–0008 of the V. M. Gorbatov Federal Research Center for Food Systems of the Russian Academy of Sciences

ACKNOWLEDGEMENTS: The authors express their gratitude to Universe Diagnostics LLC for their support in conducting the research, as well as to Laboratory Center for food and feed testing of the V. M. Gorbatov Federal Research Center for Food Systems of the Russian Academy of Sciences and personally to Aleksey Antonovich Ivanov, research engineer at the Laboratory Center, for performing analytical studies on the quantitative determination of antibiotics in experimental samples.

1. Введение

Производители сельскохозяйственной продукции активно применяют различные противомикробные ветеринарные лекарственные средства (ВЛС) для профилактики инфекционных заболеваний, в том числе у лактирующих животных. По оценкам ученых, использование антибиотиков в животноводстве составляет более 70% от их мирового использования. В настоящее время объем антимикробных препаратов для скота более чем в 2 раза превышает объем аналогичных средств для людей [1,2].

Обладая высокой пищевой ценностью и значимой ролью в экономике, молочная продукция составляет важную часть глобального продовольственного рынка и ее разнообразие обеспечивается множеством технологических подходов. Особую актуальность приобретает проблема остаточных количеств антибиотиков в сырье для ферментированных продуктов, поскольку их наличие нарушает технологические процессы, снижая потребительские свойства продукции и приводя к прямым экономическим убыткам в отрасли [1].

Больше всего способов применения антимикробных ветпрепаратов существует для лактирующих животных [2]. На концентрацию остатков антибиотиков в молоке влияет множество факторов, включая характеристики и здоровье животного, количество, тип и способ введения антибиотиков, количество производимого молока и т.д. [3–6]. В организме животного основная доза введенного антибиотика подвергается биотрансформации — метаболизируется с целью детоксикации. Преобладающим путем экскреции как первичного соединения, так и образовавшихся метаболитов является почечный (с мочой), тогда как выделение с фекалиями играет второстепенную роль. Однако часть препарата может сохраняться в организме животного в течение определенного периода и содержаться в молоке. Следовательно, обязательным требованием является строгое соблюдение установленного периода выведения препарата. Нарушение регламента (сокращение продолжительности периода выведения, превышение дозы) может быть причиной обнаружения остаточных количеств антибиотиков как в сыром молоке, так и в конечных продуктах его переработки. Критическим фактором является возможность «скрытого» присутствия антибиотиков, поскольку их концентрация на этапе приемки сырья может быть субпороговой и не регистрироваться стандартными методами контроля; однако в ходе технологического процесса может происходить их кумуляция в конечном продукте [7–10].

Глобальным ответом на риск присутствия антибиотиков в пище стала разработка нормативов MRL (Maximum Residue Limit — максимальный остаточный предел) такими структурами, как EFSA (Европейское агентство по безопасности пищевой продукции), FDA (Управление по санитарному надзору за качеством пищевых продуктов и медикаментов, США), FAO (Продовольственная и сельскохозяйственная организация ООН) и WHO (Всемирная организация здравоохранения) [11–14]. Однако мониторинговые исследования фиксируют устойчивое превышение установленных пределов. Так, анализ, обобщающий данные ряда работ, указывает, что в 4,8–9,7% образцах свежего молока концентрация остатков антибиотиков превышает MRL [15].

Согласно техническим регламентам ТР ТС 033/2013[1] и ТР ТС 021/2011[2], предельные уровни антибиотиков установлены для сырого молока и готовой молочной продукции без корректировки на массовую долю сухих веществ в продукте. И чтобы гарантировать соответствие готовой продукции нормативам, переработчик вынужден устанавливать собственные, более строгие критерии приемки сырья. При этом даже «чистое» по стандартам MRL молоко может содержать фоновые количества антибиотиков, которые, оставаясь в рамках нормы для сырья, теоретически способны мигрировать в готовую продукцию [16].

Подавляющая часть сведений о переносе антибактериальных средств получена в модельных экспериментах по внесению исследуемых доз препаратов в контрольное молоко и оценке результатов его технологической переработки. Применение данной методологии позволило установить, что степень перехода ветеринарных лекарственных средств в конечный продукт является переменной величиной, определяемой спецификой технологического процесса [17].

Потребление йогуртов и сыров уступает по объему только цельномолочной продукции. При всем разнообразии технологических рецептур пастеризация остается необходимым технологическим звеном в производстве ферментированных молочных продуктов в России. Именно тепловое воздействие запускает процессы разложения антимикробных препаратов, снижая их конечную концентрацию или биоактивность в продукте [18]. Однако литературные данные о степени такого снижения демонстрируют высокую вариабельность, обусловленную классом антибиотика, свойствами молочной матрицы, а также режимами обработки. Влияние молочной матрицы неоднозначно: по одним исследованиям, термическое разложение пенициллинов в воде происходит интенсивнее, чем в молоке [19], в то время как другие ученые оценивают результаты по пенициллинам и тетрациклинам как противоречивые [18]. Снижение концентрации антибиотиков при пастеризации, как правило, не превышает порога, позволяющего говорить о существенной деконтаминации [20]. Даже с учетом различий в термостабильности препаратов температурный режим обработки не является инструментом полного удаления остаточных количеств, что напрямую отражается на качестве йогурта, выработанного из молока, исходно содержавшего антибиотики [19,21].

Исследования указывают на зависимость распределения антибиотиков в молоке от их липофильности. В исследовательской работе Hakk с коллегами [22] установлено, что свыше 90% пенициллина G, сульфадиметоксина, окситетрациклина и эритромицина концентрируется в обезжиренной фракции молока. Данный вывод согласуется с результатами других исследований, так как тетрациклины более чем на 80% остаются в обезжиренном молоке [21] и сульфаниламиды преимущественно распределяются в водной фазе [23]. Исключением из этой тенденции выступает хлорамфеникол, который, напротив, накапливается в высокожирных продуктах (масло, сметана), обнаруживаясь в значительно меньших количествах в белом сыре и сыворотке [24].

Мировой ассортимент сыров исчисляется тысячами наименований. Это многообразие складывается из вариаций по трем основным параметрам: источник молока (вид животного), характеристики самого молока (сырое/пастеризованное, нормализованное по жиру) и, что наиболее важно, производственная технология. Тем не менее при производстве большого разнообразия сыров обычно используются следующие приемы: нагревание, добавление закваски и/или подкисление, добавление сычужного фермента и коагуляция, слив сыворотки, прессование сгустка и посолка. В сыроделии именно этапы коагуляции и синерезиса определяют конечное распределение остатков антибиотиков между фракциями, в связи с чем они стали центральными в исследованиях, построенных на принципе модельной контаминации. С использованием этой схемы изучено распределение широкого спектра антибиотиков между творогом и сывороткой на основе молока различных сельскохозяйственных животных — КРС [23,25–28], овец [29,30] и коз [20,31,32].

Основной вывод из рассмотренных работ заключается в зависимости между свойствами антибиотиков и их распределением в сыре или твороге, которое обуславливается растворимостью в воде и связыванием с белками или жирами [22,31]. Примером служат гидрофильные β-лактамы, в основном переходящие в сыворотку [25,26,31] и практически не накапливающиеся в сырном тесте, что подтверждено для образцов различного происхождения [18]. Данный аспект приобретает особую практическую значимость с учетом широкого использования сыворотки в пищевой промышленности и в качестве компонента кормов для животных [33].

[1] Технический регламент Таможенного Союза ТР ТС 033/2013 «О безопасности молока и молочной продукции»: принят Решением Совета Евразийской экономической комиссии от 9 октября 2013 года № 67; дата введения 01.05.2014. Электронный ресурс https://docs.cntd.ru/document/499050562. Дата доступа 28.01.2026

[2] Технический регламент Таможенного союза ТР ТС 021/2011 «О безопасности пищевой продукции»: утвержден решением Комиссии Таможенного союза от 9 декабря 2011 года N 880; дата введения 01.07.2013 // Электронный ресурс https://docs.cntd.ru/document/902320560. Дата доступа 28.01.2026

Помимо хорошо изученных β-лактамов, подробно исследовано поведение тетрациклинов в сырах из молока различных животных (коровьего [21], овечьего [29,30], козьего [20]). Обобщая данные, Giraldo и соавторы [31] указывают на повышенную склонность к удержанию в сырной массе у аминогликозидов, хинолонов и тетрациклинов, что основано на наблюдении снижения антимикробной активности в сыворотке на 84–100 % для указанных групп. В то же время для мягких сыров картина может быть менее однозначной. Как отмечают Quintanilla и др. [11], получение противоречивых результатов при использовании обогащенного различными антибиотиками молока может объясняться повышенной влажностью и высоким содержанием сыворотки в таком типе сыров.

Процессы, происходящие с остатками антибиотиков в сыре в период созревания, были изучены в ряде работ [20,29,30,32]. Опубликованные данные свидетельствуют о выраженной тенденции к снижению их концентрации по мере выдержки сыров. Так, в сыре Тронхон остатки β-лактамных антибиотиков и эритромицина полностью разлагались в течение 30 суток созревания [20]. В отличие от них, хинолоны (энрофлоксацин и ципрофлоксацин) демонстрируют значительно более высокую стабильность, за аналогичный период степень их разложения находилась на уровне 30–45 % [11,32]. Данные о стабильности окситетрациклина различаются в разных исследованиях. В созревшем сыре Тронхон было выявлено 95 %-ное снижение содержания окситетрациклина [20], тогда как в 60- и 90-дневном созревшем овечьем сыре наблюдалось снижение только на 15–19 % по сравнению со свежими сырами [29,30]. Технологические режимы созревания сыра (температура, влажность, продолжительность) варьируют в широких пределах, что напрямую может влиять на интенсивность химической и/или ферментативной деструкции молекул антибиотиков, предположительно являясь ключевым фактором, определяющим темпы снижения их концентрации [29,30,34].

Именно эта вариабельность технологических режимов служит вероятным объяснением расхождений в данных, получаемых различными исследователями.

Неоднородность распределения лекарственных препаратов в молочной продукции была экспериментально подтверждена Cerkvenik совместно с коллегами [35]. На примере йогурта и сывороточно-альбуминного сыра исследователями зафиксирован значительный разброс количественных показателей, что исключает возможность интерпретации полученных величин как статистически однородной выборки [35]. При этом в других исследованиях, посвященных распределению пенициллина, установлено, что основная масса антибиотика локализуется в водной фазе, а его доля в других компонентах незначительна. Однако в высокожирных продуктах, в частности в сырах, отмечается относительное увеличение концентрации пенициллина, что авторы связывают с его аффинностью к липидной фракции [35].

Установленная зависимость распределения антибиотиков от их физико-химических свойств [34,36,37] ставит перед исследователями задачу более детального изучения распределения антибиотиков. Критически важно определить закономерности перехода ветеринарных препаратов из сырья в готовый продукт даже при их фоновом (субпороговом) содержании в молоке.

Для моделирования процессов миграции остатков антибиотиков при производстве сыра сотрудниками ВНИМИ была осуществлена опытная выработка сыра Адыгейский. В качестве модельного контаминанта использовали окситетрациклин. Обоснованием выбора послужила распространенность тетрациклинов, обусловленная широким спектром их действия, и их лидирующая позиция среди антибиотиков, выявляемых при контроле сырной продукции [7]. Установлено, что окситетрациклин накапливается в сыворотке, являясь при этом гидрофобным соединением. Его содержание в сыворотке составило от первоначального 64–66 %. Также значительное количество окситетрациклина выявлено в сливках — 31–30 %. В сырном зерне наблюдалась наименьшая остаточная концентрация антибиотиков — 4–5 % относительно уровня, внесенного в исходное молоко [7].

Таким образом, в результате анализа литературных данных по исследованию перераспределения остаточных количеств противомикробных препаратов, попавших в молоко-сырье между конечными продуктами его переработки, показана многофакторность и неоднозначность проблемы. Имеющиеся открытые литературные источники не позволяют сделать однозначных выводов о влиянии конкретных технологических параметров производства и состава молочных продуктов, а также химической природы антибиотика на распределение остатков антибиотиков. Необходимо продолжить комплексные исследования и анализ рисков несоответствия ряда молочных продуктов установленным нормам безопасности.

Цель данной работы — оценка рисков снижения безопасности продуктов сыроделия путем исследования перераспределения остаточных количеств антибиотиков между сывороткой и сырным тестом с учетом вида сыра и в зависимости от природы антибиотика в молоке-сырье.

2. Материалы и методы

Для оценки распределения остаточных количеств антибиотиков в молоке-сырье между сывороткой и сырным тестом при производстве сыров применяли имитационные методы исследования.

Объектами исследований являлись:

- молоко коровье сырое для выработки сыров;
- нормализованная молочная смесь;
- подсырная сыворотка;
- сыр после прессования, выработанный по традиционной технологии сыра Голландский;
- сыр Адыгейский;
- антибиотики шести различных групп: пенициллины (ампициллин); тетрациклины (тетрациклин, хлортетрациклин, докситетрациклин); аминогликозиды (стрептомицин); хлорамфениколы (левомицетин); фторхинолоны (ципрофлоксацин); макролиды (эритромицин).

В ходе работы проведен анализ опубликованных доступных научных материалов по теме исследования. Систематический поиск источников выполнялся с использованием международных и российских библиографических баз и репозиториев: PubMed (National Center for Biotechnology Information, США), ScienceDirect (Elsevier, Нидерланды), Google Scholar («Академия Google»), а также отечественных платформ — eLibrary.ru и научной электронной библиотеки «КиберЛенинка».

Экспериментальные партии сыра вырабатывали в условиях цеха ВНИИМС (г. Углич, Ярославская область). Для их производства применяли коровье молоко-сырье от поставщика ООО «Агриволга» (д. Бурмасово, Угличский р-н, Ярославская область).

Для оценки распределения антибиотиков различных групп вырабатывали полутвердый сыр Голландский с массовой долей жира в сухом веществе 45 % из молока, пастеризованного при температуре (72 ± 1) °С с выдержкой 20–25 секунд. В подготовленную к свертыванию смесь при температуре (31 ± 1) °С вносили производственную закваску, приготовленную на цельном молоке с использованием БК-Углич-СТ (ВНИИМС — филиал ФГБНУ «ФНЦ пищевых систем им. В. М. Горбатова» РАН, Углич, Ярославская область), в дозе 0,6 % от объема молочной смеси. Далее вносили 1,0 г/100 дм^3 сычужного фермента ТВС «Фермент сычужный 90» марки «Экстра» (ООО «Завод эндокринных ферментов», Россия). Продолжительность свертывания смеси — (35 ± 5) минут. После постановки зерно вымешивалось (23 ± 1) минуты до начала второго нагревания. Готовность зерна ко второму нагреванию определяли по плотности, упругости и форме. Температура второго нагревания была выбрана (40 ± 1) °С, с общей продолжительностью выдержки (30 ± 1) минут. Сыр формовался из пласта. Масса головки после прессования составила (5 ± 0,2) кг.

Для оценки распределения антибиотиков тетрациклиновой группы (докситетрациклина, хлортетрациклина, тетрациклина) вырабатывали Адыгейский сыр с массовой долей жира в сухом веществе 45 % из молока, пастеризованного при температуре (94 ± 1) °С с выдержкой 20–25 секунд. В молоко при температуре пастеризации вносили кислую сыворотку (90 ± 1) °Т в дозе (10,0 ± 0,1) % от объема молочной смеси. Продолжительность выдержки смеси — (8 ± 1) минут при температуре (94 ± 1) °С. Всплывший сгусток выкладывали в конические перфорированные корзины для самопрессования в течение (15 ± 1) минут. Перекладывали в формы без перфорации с последующей обсушкой в камере созревания Spazion 410L (Spazion, Россия) с температурой воздуха (9 ± 1) °С в течение (16,0 ± 0,1) часов. Масса головки после обсушки — (2,0 ± 0,1) кг.

Модельные выработки сыров проведены с дополнительным внесением в нормализованную молочную смесь антибиотиков шести различных групп, нормированных по ТР ТС 021/2011 и ТР ТС 033/2013: пенициллинов (ампициллин); тетрациклинов (тетрациклин, хлортетрациклин, докситетрациклин); аминогликозидов (стрептомицин); хлорамфеникола (левомицетина); фторхинолонов (ципрофлоксацин); макролидов (эритромицин). В выработках использованы стандарты антибиотиков, произведенные Sigma-Aldrich (США), ФГБУ «Всероссийский государственный Центр качества и стандартизации лекарственных средств для животных и кормов» (Россия, Москва), European Directorate for the Quality of Medicines & HealthCare European Pharmacopoeia (Ph. Eur.) (Strasbourg, France).

Антибиотики вносились в пастеризованную молочную смесь в виде растворов, приготовленных из стандартов на стерильной дистиллированной воде. Для получения значимых результатов количество внесенных антибиотиков существенно превышало нормированный по ТР ТС 021/2011 и ТР ТС 033/2013 уровень в молоке. Расчетные дозы внесения составляли:

- ампициллин — 35,0 мкг/кг;
- тетрациклин — 250,0 мкг/кг;
- хлортетрациклин — 250,0 мкг/кг;
- докситетрациклин — 250,0 мкг/кг;
- стрептомицин — 4000,0 мкг/кг;
- ципрофлоксацин — 50,0 мкг/кг;
- эритромицин — 2500,0 мкг/кг;
- левомицетин — 200,0 мкг/кг.

После выработки сыров образцы молочной смеси, сыворотки и сыров замораживали при температуре минус (18 ± 1) °С и передавали для определения остаточного количества антибиотиков в НИИЦ ФГБНУ «ФНЦ пищевых систем им. В. М. Горбатова» РАН. Массовую долю антибиотиков определяли по следующим нормативно-техническим документам:

- ампициллин, левомицетин — ГОСТ 34533-2019[3];
- тетрациклин, докситетрациклин, хлортетрациклин — ГОСТ 31694-2012[4];
- ципрофлоксацин — ГОСТ 32797-2014[5];
- эритромицин — ГОСТ 34136-2017[6];
- стрептомицин — ГОСТ 32798-2014[7].

Контроль показателей микробиологической обсемененности и качества молока коровьего сырого определяли по следующим нормативно-техническим документам:

- количество спор аэробных и факультативно-анаэробных МО рода *Bacillus* — ГОСТ 32901-2014[8];
- количество спор анаэробных МО рода *Clostridium* — ГОСТ 32012-2012[9];
- количество дрожжей — ГОСТ 33566-2015[10];
- количество мезофильных аэробных и факультативно анаэробных микроорганизмов (КМАФАнМ) — ГОСТ 32901-2014[8];
- наличие или отсутствие антибиотиков — ГОСТ Р 59507–2021 (иммунохимический биоанализатор EXTENSO (Unisensor S. A., Бельгия)[11];
- наличие или отсутствие ингибирующих веществ — ГОСТ 23454-2016[12];
- количество соматических клеток — ГОСТ 23453-2014[13];
- сычужная проба — ГОСТ 32901-2014[8];
- титруемая кислотность — ГОСТ Р 54669–2011[14].

Общее количество заквасочных микроорганизмов определяли методом, основанным на способности мезофильной заквасочной микрофлоры расти на твердой питательной среде[15].

Количество ароматообразующих заквасочных микроорганизмов определяли путем посева на питательную среду с 4-водным цитратом кальция ($Ca_3(C_6H_5O_7)2 \cdot 4H_2O$ (АО «База № 1 Химреактивов»)[16]. Метод основан на способности цитратсбраживающих микроорганизмов при развитии на плотных питательных средах с цитратом кальция в течение 48–72 ч. при температуре (30 ± 1) °С образовывать зоны просветления вокруг колоний.

Количество термофильных заквасочных микроорганизмов определяли методом, основанным на способности термофильной заквасочной микрофлоры расти на твердой питательной среде при температуре (45 ± 1) °С[15].

Расчет доли антибиотика в сыворотке проводили по формуле 1:

$$\omega_{сыв} = \frac{m_{сыв} \times n_{сыв}}{m_{см} \times n_{см}} \times 100\%, \quad (1)$$

где: $\omega_{сыв}$ — доля антибиотика, перешедшего в сыворотку, %; $m_{сыв}$ — масса сыворотки, кг; $n_{сыв}$ — концентрация антибиотика в сыворотке, мкг/кг; $m_{см}$ — масса молочной смеси для выработки сыров, кг; $n_{см}$ — концентрация антибиотика в молочной смеси для выработки сыров, мкг/кг.

Расчет доли антибиотика в сырах после прессования проводили по формуле 2:

$$\omega_{сыр} = \frac{m_{сыр} \times n_{сыр}}{m_{см} \times n_{см}} \times 100\%, \quad (2)$$

где: $\omega_{сыр}$ — доля антибиотика, перешедшего в сыр, %; $m_{сыр}$ — масса сыра, кг; $n_{сыр}$ — концентрация антибиотика в сыре, мкг/кг; $m_{см}$ — масса молочной смеси для выработки сыров, кг; $n_{см}$ — концентрация антибиотика в молочной смеси для выработки сыров, мкг/кг.

Все эксперименты были проведены в трехкратной биологической повторности. Для статистического анализа использовали стандартные методы, реализованные в программе Microsoft Excel и в программной среде R (версия 4.3.1). Статистически значимыми считали различия при $p < 0,05$.

3. Результаты и обсуждение

Сыр как концентрат молочных сухих веществ представляет собой критическую точку накопления контаминантов. В условиях расширения списка нормируемых ветеринарных препаратов (ТР ТС 021/2011) оценка баланса распределения антибиотиков между сырной массой и сывороткой перешла из разряда академических задач в разряд прикладных, необходимых для обеспечения соответствия готовой продукции техническому регламенту.

В ходе работы были изготовлены опытные партии сыра Голландский. Качество исходного сырого молока контролировали по двум направлениям — общим параметрам безопасности согласно ТР ТС 033/2013 и специфическим показателям, определяющим его сыропригодность (Таблице 1).

По результатам анализа данных, представленных в Таблице 1, можно сделать вывод, что используемое для экспериментальных выработок сыров молоко-сырье соответствует как общим критериям безопасности, так и критериям сыропригодности и не содержит ингибирующих веществ, в том числе исследованных групп антибиотиков.

В Таблице 2 представлены результаты исследования микробиологических показателей производственной закваски и молочной смеси после внесения закваски.

Как видно из данных, приведенных в Таблице 2, производственная закваска и молочные смеси полностью удовлетворяли установленным требованиям по количеству и составу заквасочных микроорганизмов. Анализ показал, что общая концентрация молочнокислых микроорганизмов во всех исследованных образцах находилась в заданном технологическом диапазоне.

В Таблицах 3 и 4 приведены результаты микробиологических исследований подсырной сыворотки и сыров после прессования.

Наиболее сильное ингибирование заквасочной микрофлоры наблюдается при наличии ампициллина в молочной смеси, что подтверждается результатами микробиологического мониторинга на двух ключевых технологических этапах производства сыра (подсырная сыворотка — Таблица 3, сыр после прессования — Таблица 4).

[3] ГОСТ 34533-2019 «Продукты пищевые, продовольственное сырье. Метод определения остаточного содержания сульфаниламидов, нитроимидазолов, пенициллинов, амфениколов с помощью высокоэффективной жидкостной хроматографии с масс-спектрометрическим детектором». — Москва: Стандартинформ, 2019. — 20 с.

[4] ГОСТ 31694-2012 «Продукты пищевые, продовольственное сырье. Метод определения остаточного содержания антибиотиков тетрациклиновой группы с помощью высокоэффективной жидкостной хроматографии с масс-спектрометрическим детектором». — Москва: Стандартинформ, 2013. — 29 с.

[5] ГОСТ 32797-2014 «Продукты пищевые, продовольственное сырье. Метод определения остаточного содержания хинолонов с помощью высокоэффективной жидкостной хроматографии с масс-спектрометрическим детектором». — Москва: Стандартинформ, 2015. — 21 с.

[6] ГОСТ 34136-2017 «Продукты пищевые, продовольственное сырье. Метод определения остаточного содержания макролидов, линкозамидов и плевромутилинов с помощью высокоэффективной жидкостной хроматографии с масс-спектрометрическим детектированием». — Москва: Стандартинформ, 2018. — 20 с.

[7] ГОСТ 32798-2014 «Продукты пищевые, продовольственное сырье. Метод определения остаточного содержания аминогликозидов с помощью высокоэффективной жидкостной хроматографии с масс-спектрометрическим детектором». — Москва: Стандартинформ, 2015.-27 с.

[8] ГОСТ 32901-2014 «Молоко и молочная продукция. Методы микробиологического анализа». — Москва: Стандартинформ, 2015. — 25 с.

[9] ГОСТ 32012-2012 «Молоко и молочная продукция. Методы определения содержания спор мезофильных анаэробных микроорганизмов». — Москва: Стандартинформ, 2019. — 11 с.

[10] ГОСТ 33566-2015 «Молоко и молочная продукция. Определение дрожжей и плесневых грибов». — Москва: Стандартинформ, 2019. — 13 с.

[11] ГОСТ Р 59507–2021 «Молоко и молочное сырье. Определение наличия остаточного содержания антибиотиков и лекарственных веществ иммунологическими методами». — Москва: Стандартинформ, 2021. — 35 с.

[12] ГОСТ 23454-2016 «Молоко. Методы определения ингибирующих веществ». — Москва: Стандартинформ, 2019. — 11 с.

[13] ГОСТ 23453-2014 «Молоко сырое. Методы определения соматических клеток». — Москва: Стандартинформ, 2014. — 13 с.

[14] ГОСТ Р 54669–2011 «Молоко и продукты переработки молока. Методы определения кислотности». — Москва: Стандартинформ, 2019. — 9 с.

[15] ГОСТ 33951-2016 «Молоко и молочная продукция. Методы определения молочнокислых микроорганизмов». — Москва: Стандартинформ, 2016. — 15 с.

[16] ГОСТ 34372-2017 «Закваски бактериальные для производства молочной продукции. Общие технические условия». — Москва: Стандартинформ, 2018. — 22 с.

Таблица 1. **Результаты исследований микробиологических показателей безопасности и качества молока коровьего сырого, использованного в выработках сыров**

Table 1. **Results of the study of microbiological indicators of safety and quality of raw cow's milk used in cheese production**

Показатель	Результаты	Нормы
Общие критерии безопасности		
КМАФАнМ, КОЕ/см^3	$(6{,}2 \pm 3{,}1) \times 10^4$	не более $3{,}0 \times 10^5$
Количество соматических клеток, тыс.кл./см^3	322 ± 31	не более 400
Антибиотики, наличие/отсутствие	отсутствуют	отсутствуют
Ингибирующие вещества, наличие/отсутствие	отсутствуют	отсутствуют
Показатели сыропригодности		
Количество спор аэробных и факультативно-анаэробных МО рода *Bacillus*, КОЕ/см^3	$(9{,}5 \pm 0{,}4) \times 10^1$	не более 10^2
Количество дрожжей, КОЕ/см^3	$(1{,}1 \pm 0{,}3) \times 10^2$	не более 10^2
Количество спор анаэробных МО рода *Clostridium*, НВЧ спор/см^3	$(0{,}6 \pm 0{,}6) \times 10^1$	не более 13
Сычужная проба, класс	I	I–II

Результаты представлены в форме «среднее значение ± стандартное отклонение» (n = 3 биологические повторности).

Таблица 2. **Результаты микробиологических исследований производственной закваски и молочной смеси после внесения закваски**

Table 2. **Results of the microbiological analysis of the production starter culture and milk mixture after introduction of the starter culture**

Образец (вариант)	Количество заквасочных микроорганизмов		
	общее, КОЕ/см^3	термофильных, КОЕ/см^3	ароматообразующих, КОЕ/см^3
Производственная закваска	$(1{,}4 \pm 0{,}4) \times 10^9$	$(4{,}3 \pm 0{,}6) \times 10^7$	$(3{,}8 \pm 0{,}3) \times 10^8$
Молочная смесь 1 (Ампициллин)	$(1{,}1 \pm 0{,}2) \times 10^7$	$(4{,}4 \pm 0{,}4) \times 10^5$	$(3{,}6 \pm 0{,}4) \times 10^6$
Молочная смесь 2 (Тетрациклин)	$(1{,}4 \pm 0{,}3) \times 10^7$	$(5{,}1 \pm 0{,}5) \times 10^5$	$(3{,}6 \pm 0{,}3) \times 10^6$
Молочная смесь 3 (Ципрофлоксацин)	$(1{,}2 \pm 0{,}1) \times 10^7$	$(4{,}3 \pm 0{,}4) \times 10^5$	$(3{,}1 \pm 0{,}3) \times 10^6$
Молочная смесь 4 (Эритромицин)	$(1{,}1 \pm 0{,}2) \times 10^7$	$(4{,}5 \pm 0{,}7) \times 10^5$	$(3{,}7 \pm 0{,}5) \times 10^6$
Молочная смесь 5 (Стрептомицин)	$(1{,}6 \pm 0{,}2) \times 10^7$	$(4{,}6 \pm 0{,}5) \times 10^5$	$(3{,}3 \pm 0{,}4) \times 10^6$
Молочная смесь 6 (Левомицетин)	$(1{,}8 \pm 0{,}3) \times 10^7$	$(4{,}1 \pm 0{,}4) \times 10^5$	$(3{,}0 \pm 0{,}4) \times 10^6$

Результаты представлены в форме «среднее значение ± стандартное отклонение» (n = 3 биологические повторности).

Таблица 3. **Результаты микробиологических исследований подсырной сыворотки**

Table 3. **Results of the microbiological analysis of cheese whey**

Образец сыворотки	Количество заквасочных микроорганизмов		
	общее КОЕ/см^3	термофильных, КОЕ/см^3	ароматообразующих, КОЕ/см^3
Ампициллин (1)	$(1{,}1 \pm 0{,}2) \times 10^3$	$(2{,}0 \pm 0{,}2) \times 10^1$	$(8{,}3 \pm 0{,}3) \times 10^2$
Тетрациклин (2)	$(2{,}4 \pm 0{,}3) \times 10^6$	$(1{,}6 \pm 0{,}2) \times 10^4$	$(5{,}6 \pm 0{,}4) \times 10^5$
Ципрофлоксацин (3)	$(4{,}8 \pm 0{,}3) \times 10^6$	$(1{,}5 \pm 0{,}4) \times 10^6$	$(2{,}6 \pm 0{,}3) \times 10^6$
Эритромицин (4)	$(4{,}9 \pm 0{,}4) \times 10^5$	$(4{,}0 \pm 0{,}5) \times 10^4$	$(1{,}6 \pm 0{,}3) \times 10^5$
Стрептомицин (5)	$(4{,}8 \pm 0{,}2) \times 10^4$	$(1{,}8 \pm 0{,}3) \times 10^4$	$(5{,}0 \pm 0{,}4) \times 10^3$
Левомицетин (6)	$(8{,}2 \pm 0{,}3) \times 10^6$	$(2{,}2 \pm 0{,}4) \times 10^6$	$(2{,}5 \pm 0{,}5) \times 10^6$

Результаты представлены в форме «среднее значение ± стандартное отклонение» (n = 3 биологические повторности).
Красным цветом выделен образец с наиболее сильным ингибированием заквасочной микрофлоры.

Таблица 4. **Результаты микробиологических исследований сыра после прессования**

Table 4. **Results of the microbiological analysis of cheese after pressing**

Образец сыра	Количество заквасочных микроорганизмов		
	общее КОЕ/г	термофильных, КОЕ/г	ароматообразующих, КОЕ/г
Ампициллин (1)	$(7{,}8 \pm 0{,}8) \times 10^4$	$(1{,}0 \pm 0{,}1) \times 10^2$	$(3{,}5 \pm 0{,}3) \times 10^4$
Тетрациклин (2)	$(1{,}7 \pm 0{,}2) \times 10^8$	$(1{,}5 \pm 0{,}2) \times 10^6$	$(2{,}7 \pm 0{,}3) \times 10^7$
Ципрофлоксацин (3)	$(1{,}1 \pm 0{,}3) \times 10^9$	$(3{,}4 \pm 0{,}2) \times 10^8$	$(1{,}4 \pm 0{,}2) \times 10^8$
Эритромицин (4)	$(9{,}6 \pm 0{,}9) \times 10^6$	$(5{,}3 \pm 0{,}5) \times 10^5$	$(7{,}6 \pm 0{,}6) \times 10^5$
Стрептомицин (5)	$(1{,}9 \pm 0{,}2) \times 10^6$	$(1{,}8 \pm 0{,}2) \times 10^6$	$(6{,}6 \pm 0{,}3) \times 10^4$
Левомицетин (6)	$(9{,}7 \pm 0{,}8) \times 10^8$	$(1{,}0 \pm 0{,}1) \times 10^9$	$(8{,}7 \pm 0{,}3) \times 10^7$

Результаты представлены в форме «среднее значение ± стандартное отклонение» (n = 3 биологические повторности).
Красным цветом выделен образец с наиболее сильным ингибированием заквасочной микрофлоры.

После стадии второго нагревания наблюдалось резкое снижение количества жизнеспособных клеток заквасочных микроорганизмов. Наиболее выраженное бактерицидное действие проявил ампициллин. В сырах после прессования численность жизнеспособных клеток заквасочных культур снизилась до крайне низких значений, что делает невозможным нормальное протекание молочнокислого процесса в ходе созревания сыров, ставя под угрозу весь производственный цикл и качество готового продукта. Отмеченная закономерность согласуется с известным механизмом действия препарата, активного в отношении грамположительных бактерий, к которым принадлежат молочнокислые микроорганизмы [25,26,38].

Стрептомицин, эритромицин и тетрациклин также демонстрировали ингибирующую активность, однако их воздействие являлось менее выраженным по сравнению с ампициллином, вызывая значимое, но не критическое снижение численности заквасочных культур.

Отмеченные различия можно объяснить механизмом их действия и спектром активности. Стрептомицин в первую очередь эффективен против грамотрицательных бактерий, а его влияние на молочнокислые культуры может быть умеренным и зависит от фенотипической устойчивости [38–41]. Эритромицин, проявляя бактериостатическое действие, замедляет рост заквасочной микрофлоры, но не приводит к ее уничтожению [41–43]. Умеренное влияние тетрациклина объясняется устойчивостью молочнокислых микроорганизмов к его воздействию [44–46]. Однако в ряде исследований продемонстрирована высокая чувствительность многих штаммов молочнокислых бактерий к тетрациклину, что проявлялось в существенном ингибировании их роста уже при низких концентрациях антибиотика [41,43,47]. Стоит отметить, что наличие в молоке исследованных антибиотиков хоть и не влияет критически на количество жизнеспособных клеток заквасочного микробиома, но нарушает динамику молочнокислого процесса, что может негативно сказаться на кислотообразовании и органолептических свойствах готового сыра.

Нейтральными из изученных антибиотиков в контексте влияния на количество заквасочный микроорганизмов отмечены ципрофлоксацин и левомицетин. Согласно представленным результатам (Таблицы 3 и 4), исследуемые антибиотики практически не оказали негативного влияния на развитие технологической микрофлоры. Анализ данных (Таблица 4) показал, что количество заквасочных микроорганизмов в сыре после прессования в опытных вариантах 3 и 6 достигло необходимых значений, сопоставимых с сырами, произведенными из молока без ингибиторов, что объясняется специфичностью их антимикробного действия. Ципрофлоксацин наиболее активен против грамотрицательных бактерий, при этом у многих заквасочных микроорганизмов присутствует ген, ассоциированный с резистентностью к ципрофлоксацину [45,48,49]. При этом левомицетин, обладая широким антибактериальным спектром, может проявлять меньшую активность в отношении конкретных штаммов молочнокислых бактерий, используемых в закваске, или же медленнее проникать в бактериальную клетку в условиях молочной среды [50]. В то же время имеющиеся в литературе сведения о чувствительности заквасочных культур к данному антибиотику весьма неоднозначны и варьируют от полной устойчивости до выраженного ингибирования роста [51–53]. Таким образом, несмотря на свою антибактериальную природу, ципрофлоксацин и левомицетин не представляют серьезной технологической опасности для сыроделия, как ампициллин.

С технологической точки зрения принципиально важно определить не только влияние антибиотиков на микробиологические процессы на этапе производства сыров, но и изучить перераспределение остаточных количеств антибиотиков между сывороткой и сырным тестом с учетом вида сыра и в зависимости от природы антибиотика в молоке-сырье. Для решения этой задачи проведен анализ фазового распределения антибиотиков. Результаты распределения внесенных в молочную смесь антибиотиков между сывороткой и сыром после прессования приведены на Рисунке 1.

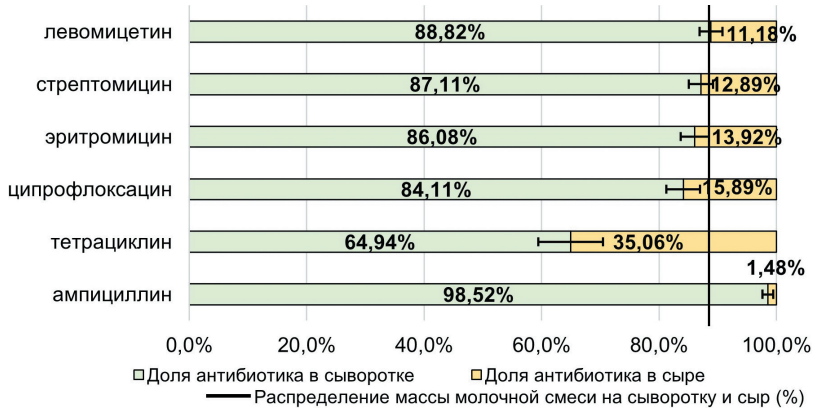


Рисунок 1. **Долевое распределение антибиотиков в процессе выработки между сывороткой и полутвердым сыром**
Figure 1. **Proportional distribution of antibiotics between whey and semi-hard cheese during production**

Проведенный анализ долевого распределения антибиотиков позволил выявить особенности в поведении различных антибактериальных веществ в процессе выработки полутвердых сыров. Основная группа исследованных антибиотиков — левомицетин, стрептомицин, эритромицин и ципрофлоксацин — демонстрирует сопоставимое долевое распределение. Установлено, что в среднем более 85 % от их исходного количества оставалось в сыворотке, и лишь сравнительно небольшая часть антибиотиков переходила в сырное тесто (Рисунок 1). С технологической точки зрения это означает, что основная масса исследованных антибиотиков элиминируется с сывороткой, что снижает их прямое остаточное присутствие в сыре. Такой характер распределения согласуется с ранее опубликованными данными о переходе β-лактамов и аминогликозидов в водную фазу [22,25,26,31].

Существенное отклонение от закономерной модели долевого распределения наблюдалось в случае тетрациклина. Его поведение кардинально отличается, обуславливаемое тем, что у тетрациклина низкая растворимость в воде и повышенная стабильность в кислых условиях. В результате комплексного действия этих факторов доля перехода тетрациклина в сырную массу возрастает до 35 %, представляя собой повышенный риск с точки зрения накопления в готовом продукте. Стоит отметить, что показатель долевого распределения тетрациклина заметно ниже максимальных значений, описанных в научной литературе, согласно которой тетрациклины способны концентрироваться в сыре, сохраняя в нем до 75–80 % от исходных значений [21,54,55].

Наиболее полярное распределение характерно для ампициллина, по сравнению с тетрациклином. Будучи типичным представителем бета-лактамных антибиотиков (пенициллинов), ампициллин обладает выраженными гидрофильными свойствами в условиях молочной среды, что предопределяет его практически полный переход в водную фазу. Экспериментально подтверждено, что подавляющее количество (98,52 %) внесенного ампициллина переходит в сыворотку, а в сырную массу попадает лишь следовое количество (менее 1,5 %), что близко к значениям, полученным исследователями под руководством Escobar [54] и Lanyi [56].

В ходе исследования проведено сравнение содержания шести антибиотиков в исходной молочной смеси, подсырной сыворотке и сыре после прессования (Таблица 6). Для оценки статистической значимости различий между группами применен однофакторный дисперсионный анализ (Таблица 5) с последующим тестом Тьюки с целью определения однородных групп.

Результаты ANOVA показали статистически значимые различия между образцами для четырех из шести исследованных антибиотиков (таблица ANOVA). Наиболее выраженные межгрупповые различия зафиксированы для ампициллина ($F = 402,15$; $p < 0,000001$) и тетрациклина ($F = 1349,31$; $p < 0,000001$), где F-критерий значительно превысил критическое значение ($F_{крит} = 3,354$). Для ципрофлоксацина ($F = 7,798$; $p = 0,002$) и эритромицина ($F = 5,612$; $p = 0,009$) различия также оказались статистически значимыми. В то же время для стрептомицина ($F = 0,414$; $p = 0,665$) и левомицетина ($F = 0,980$; $p = 0,388$) нулевая гипотеза об отсутствии различий не была отвергнута.

Буквенные обозначения указывают на статистически однородные группы в рамках строки, где образцы с одинаковыми буквами не имеют достоверных различий между собой ($p \geqslant 0,05$), образцы с разными буквами статистически значимо различаются ($p \leqslant 0,05$).

Анализ массовых концентраций антибиотика (Таблица 6) позволил выявить значительные различия в поведении антибиотиков в технологическом процессе. Только тетрациклин продемонстрировал выраженный эффект концентрирования, его массовое содержание в сыре после прессования статистически значимо ($p \leqslant 0,05$) превышало уровень в исходной молочной смеси, увеличившись

Таблица 5. **Результаты однофакторного ANOVA (между группами)**
Table 5. **Results of one-way ANOVA (between groups)**

Параметр	Сумма квадратов (SS)	Степени свободы (df)	Средний квадрат (MS)	F-критерий	P-значение	F-критическое
Ампициллин	7031,85	2	3515,92	402,15	< 0,000001	3,354
Тетрациклин	1880255,70	2	940127,85	1349,31	< 0,000001	
Ципрофлоксацин	1712,85	2	856,43	7,798	0,002123	
Эритромицин	793506,48	2	396753,24	5,612	0,009162	
Стрептомицин	2739049,54	2	1369524,77	0,414	0,665340	
Левомицетин	1391,84	2	695,92	0,980	0,388189	

Таблица 6. **Массовое распределение антибиотиков в процессе выработки между сывороткой и полутвердым сыром**
Table 6. **Mass distribution of antibiotics between whey and semi-hard cheese during production**

Содержание антибиотика в образце	Образец		
	Молочная смесь	Подсырная сыворотка	Сыр после прессования
Ампициллин, мкг/кг	$34,12 \pm 6,82^{A}$	$37,90 \pm 7,58^{B}$	$4,46 \pm 0,89^{C}$
Тетрациклин, мкг/кг	$239,44 \pm 28,73^{A}$	$174,90 \pm 20,99^{B}$	$756,29 \pm 90,75^{C}$
Ципрофлоксацин, мкг/кг	$47,04 \pm 18,82^{A}$	$44,39 \pm 17,75^{A}$	$68,81 \pm 27,52^{B}$
Эритромицин, мкг/кг	$2739,18 \pm 520,44^{AB}$	$2674,93 \pm 508,24^{B}$	$3217,00 \pm 611,22^{A}$
Стрептомицин, мкг/кг	$4217,22 \pm 3626,8^{A}$	$4157,30 \pm 3575,28^{A}$	$4672,10 \pm 4018,01^{A}$
Левомицетин, мкг/кг	$227,34 \pm 54,56^{A}$	$227,18 \pm 54,52^{A}$	$228,64 \pm 54,87^{A}$

Результаты представлены в форме «среднее значение ± стандартное отклонение» ($n = 3$ биологические повторности).

в 3,2 раза. Для сравнения, массовая концентрация ампициллина в сыре, напротив, снизилась в 7,7 раза. Ципрофлоксацин и эритромицин показали незначительный рост, а уровни стрептомицина и левомицетина практически не изменились. Таким образом, тетрациклин переходит в сыр в значительной доле, достигая наибольшей абсолютной концентрации среди изученных антибиотиков.

Тест Тьюки позволил идентифицировать статистически однородные группы для каждого антибиотика. Для ампициллина все три образца образовали отдельные группы, что указывает на достоверные различия между каждым из них. Аналогичная картина наблюдалась для тетрациклина. Для ципрофлоксацина молочная смесь и сыворотка относились к одной группе (А), тогда как сыр образовал отдельную группу (В), что свидетельствовало о значимом изменении содержания данного антибиотика в процессе производства. Эритромицин демонстрировал более сложную картину, молочная смесь занимала промежуточное положение (АВ), сыворотка относилась к группе В, а сыр — к группе А. Напротив, для стрептомицина и левомицетина все образцы относились к единой группе, что подтверждает отсутствие статистически значимых изменений в содержании этих антибиотиков на разных этапах технологического процесса производства сыра. Полученные данные позволяют сделать вывод о разнообразном поведении антибиотиков в процессе переработки молока на сыр.

Распределение антибиотиков между сывороткой и сырным зерном может варьировать в зависимости от вида сыра, что обусловлено особенностями конкретных технологий, а также содержанием влаги и жира в продукте.

Для детального изучения особенностей перехода тетрациклина в сырное тесто проведены сравнительные исследования на примере двух различных типов сыров. На Рисунке 2 представлены результаты, иллюстрирующие распределение антибиотиков тетрациклиновой группы (тетрациклин, доксициклин и хлортетрациклин) в процессах производства сыров Голландский и Адыгейский.

Как видно из данных, представленных на Рисунке 2, распределение антибиотиков тетрациклиновой группы между сырным тестом и подсырной сывороткой демонстрировало выраженную зависимость от технологических параметров производства сыра. При производстве полутвердого сыра Голландский наблюдалось значительное накопление тетрациклинов в сырной массе, в среднем 50–55% от общего содержания концентрировалось в сырном тесте, в то время как 45–50% уходило в сыворотку. Напротив, при производстве мягкого Адыгейского сыра распределение кардинально меняется, 12–18% антибиотиков переходило из молочной смеси в сырную массу, тогда как 81–88% — в сыворотку. Наблюдаемые различия могут быть обусловлены как разной продолжительностью и температурными режимами обработки сгустка, так и различным содержанием влаги и жира в конечном продукте. Аналогичная зависимость распределения антибиотиков от типа сыра ранее была отмечена для мягких и полутвердых сыров из различного молока [11,20,29,30].

Таким образом, не только вид антибиотиков, но и выбор технологии напрямую определяют переход и конечное содержание антибиотиков в сыре, что имеет значение для безопасности пищевого продукта.

4. Выводы

Таким образом, проведенное исследование позволило выявить многофакторное влияние остаточных количеств антибиотиков как специфических антимикробных агентов на развитие заквасочных микроорганизмов во время выработки сыров. Данное влияние опосредованно отражается на ходе технологического процесса и на качестве готовых сыров. Установлено, что различные виды антибиотиков оказывают гетерогенное воздействие на заквасочную микрофлору. Так, ампициллин проявляет наиболее выраженное бактерицидное действие, подавляя развитие заквасочного микробиома и оказывая влияние на ход молочнокислого процесса во время выработки и созревания сыра. Стрептомицин, эритромицин и тетрациклин проявляют умеренное ингибирование, способное нарушить процесс кислотообразования, а для ципрофлоксацина и левомицетина не выявлено значимого воздействия в условиях эксперимента.

Анализ долевого распределения антибиотиков между сыром и сывороткой выявил два паттерна. Так, для большинства изученных антибиотиков (левомицетин, стрептомицин, эритромицин, ципрофлоксацин) характерен преимущественный переход в сыворотку (более 85%), в то время как тетрациклин демонстрирует высокую долю перехода в сырную массу (до 35%).

Установлено, что одним из ключевых факторов, влияющих на конечное распределение антибиотиков, является тип сыра. Так, при производстве полутвердого Голландского сыра 50–55% антибиотиков тетрациклиновой группы концентрируется в сырном тесте. Напротив, в технологии Адыгейского сыра 81–88% антибиотиков элиминирует в сыворотку, что снижает нагрузку на готовый продукт, но в то же время создает проблему использования в случае дальнейшего концентрирования.

Таким образом, для комплексной оценки рисков и разработки эффективных мер контроля необходимо учитывать не только исходный уровень антибиотиков в молоке-сырье, но и их фазовое

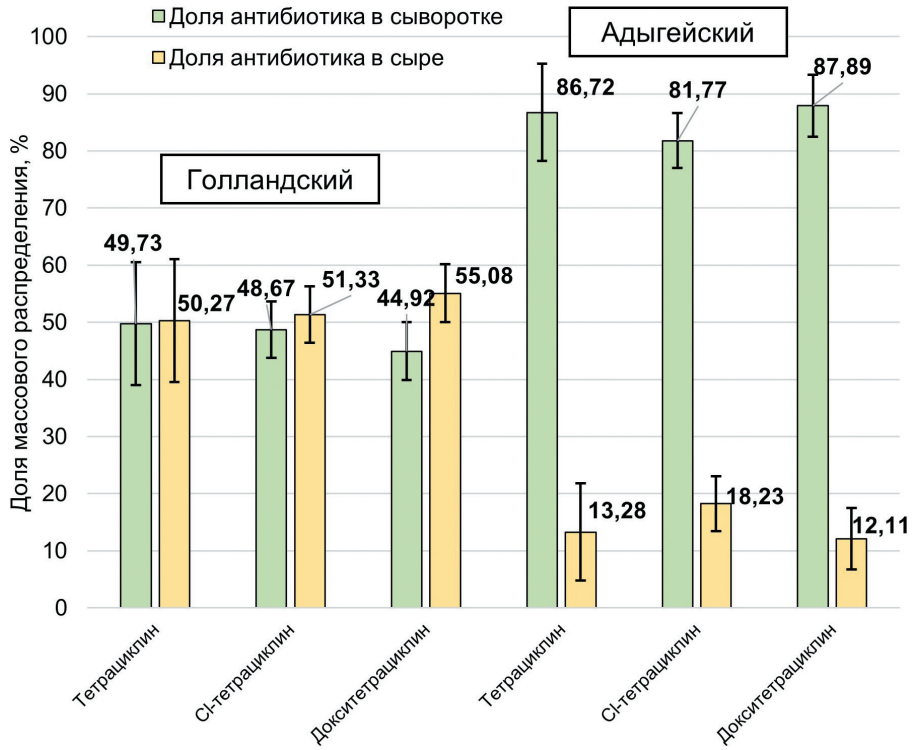


Рисунок 2. **Долевое распределение антибиотиков тетрациклиновой группы в процессе выработки Голландского и Адыгейского сыров**

Figure 2. **Proportional distribution of antibiotics of the tetracycline group during production of Gollandsky and Adygeysky cheeses**

распределение в конкретной технологической матрице, определяемое свойствами антибиотиков и технологическими параметрами производства сыра. Полученные результаты имеют важное практическое значение для оценки рисков перераспределения остаточных количеств антибиотиков, попавших в молоко-сырье, между сыром и подсырной сывороткой. Они также позволяют проводить более адекватную оценку результатов контроля готовой продукции на предмет соблюдения требований безопасности по содержанию остаточных количеств ветеринарных лекарственных средств в соответствии с ТР ТС 021/2011.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / REFERENCES

1. Шевелева, С. А., Бессонов, В. В. (2016). Вопросы нормирования и контроля антибиотиков в молоке, молочных продуктах и других продуктах животноводства. *Молочная промышленность*, 5, 32–36. [Sheveleva, S. A., Bessonov, V. V. (2016). Items of normalization and control of antibiotics in milk, milk products and other products of animal breeding. *Dairy Industry,* 5, 32–36. (In Russian)]
2. Virto, M., Santamarina-García, G., Amores, G., Hernández, I. (2022). Antibiotics in dairy production: Where is the problem? *Dairy*, 3, 541–564.
3. Van Boeckel, T. P., Brower, C., Gilbert, M., Grenfell, B. T., Levin, S. A., Robinson, T. P. et al. (2015). Global trends in antimicrobial use in food animals. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(18), 5649–5654. https://doi.org/10.1073/pnas.1503141112
4. Landers, T. F., Cohen, B., Wittum, T. E., Larson, E. L. (2012). A review of antibiotic use in food animals: Perspective, policy, and potential. *Public Health Reports*, 127(1), 4–22. https://doi.org/10.1177/003335491212700103
5. Rajala-Schultz, P., Nødtvedt, A., Halasa, T., Persson Waller, K. (2021). Prudent use of antibiotics in dairy cows: The nordic approach to udder health. *Frontiers in Veterinary Science*, 8, Article 623998. https://doi.org/10.3389/fvets.2021.623998
6. Fatemi, F., Alizadeh Sani, M., Noori, S. M. A., Hashemi, M. (2023). Status of antibiotic residues in milk and dairy products of Iran: A systematic review and meta-analysis. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 22, 31–51. https://doi.org/10.1007/s40201-023-00889-4
7. Юрова, Е. А., Мельденберг, Д. Н., Жижин, Н. А. (2019). Распределение остаточного количества антибиотиков по ходу технологического процесса. *Молочная промышленность*, 2, 26–27. [Yurova, E. A., Meldenberg, D. N., Jyjyn, N. A. (2019). Distribution of the residual quantity of antibiotics in the course of the technological process. *Dairy Industry,* 2, 26–27. (In Russian)]
8. Sachi, S., Ferdous, J., Sikder, M. H., Hussani, S. M. A. K. (2019). Antibiotic residues in milk: Past, present, and future. *Journal of Advanced Veterinary and Animal Research*, 6(3), 315–332. https://doi.org/10.5455/javar.2019.f350
9. Pol, M., Ruegg, P. L. (2007). Treatment practices and quantification of antimicrobial drug usage in conventional and organic dairy farms in Wisconsin. *Journal of Dairy Science*, 90(1), 249–261. https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(07)72626-7
10. de Albuquerque Fernandes, F. A., Magnavita, A. P. A., Ferrao, S. P. B., Gualberto, S. A., Faleiro, A. S., Figueiredo, A. J. et al. (2014). Daily ingestion of tetracycline residue present in pasteurized milk: A public health problem. *Environmental Science and Pollution Research*, 21(5), 3427–3434. https://doi.org/10.1007/s11356-013-2286-5
11. Quintanilla, P., Doménech, E., Escriche, I., Beltrán, M. C., Molina, M. P. (2019). Food safety margin assessment of antibiotics: Pasteurized goat's milk and fresh cheese. *Journal of Food Protection*, 82(9), 1553–1559. https://doi.org/10.4315/0362–028X.JFP-18-434
12. European Centre for Disease Prevention and Control, European Food Safety Authority, European Medicines Agency. (2021). Third joint inter-agency report on integrated analysis of consumption of antimicrobial agents and occurrence of antimicrobial resistance in bacteria from humans and food-producing animals in the EU/EEA. *EFSA Journal*, 19(6), Article e06712. https://doi.org/10.2903/j.efsa.2021.6712
13. Lu, G., Chen, Q., Li, Y., Liu, Y., Zhang, Y., Huang, Y. et al. (2021). Status of antibiotic residues and detection techniques used in Chinese milk: A systematic review based on cross-sectional surveillance data. *Food Research International*, 147, Article 110450. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2021.110450
14. Treiber, F. M., Beranek-Knauer, H. (2021). Antimicrobial residues in food from animal origin — A review of the literature focusing on products collected in stores and markets worldwide. *Antibiotics*, 10(5), Article 534. https://doi.org/10.3390/antibiotics10050534
15. Tiseo, K., Huber, L., Gilbert, M., Robinson, T. P., Van Boeckel, T. P. (2020). Global trends in antimicrobial use in food animals from 2017 to 2030. *Antibiotics*, 9(12), Article 918. https://doi.org/10.3390/antibiotics9120918
16. Зайцева, Н. В., Тутельян, В. А., Шур, П. З., Хотимченко, С. А., Шевелева, С. А. (2014). Опыт обоснования гигиенических нормативов безопасности пищевых продуктов с использованием критериев риска здоровью населения. *Гигиена и санитария*, 93(5), 70–74. [Zaytseva, N. V., Tutelyan, V. A., Shur, P. Z., Khotimchenko, S. A., Sheveleva, S. A. (2014). Experience of justification of hygienic standards of food safety with the use of criteria for the risk for population health. *Hygiene and Sanitation,* 93(5), 70–74. (In Russian)]
17. Hassan, H. F., Saidy, L., Haddad, R., Hosri, C., Asmar, S., Jammoul, A. et al. (2021). Investigation of the effects of some processing conditions on the fate of oxytetracycline and tylosin antibiotics in the making of commonly consumed cheeses from the East Mediterranean. *Veterinary World*, 14(6), 1644–1649. https://doi.org/10.14202/vetworld.2021.1644-1649
18. Tian, L., Khalil, S., Bayen, S. (2017). Effect of thermal treatments on the degradation of antibiotic residues in food. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 57(17), 3760–3770. https://doi.org/10.1080/10408398.2016.1164119
19. Grunwald, L., Petz, M. (2003). Food processing effects on residues: Penicillins in milk and yoghurt. *Analytica Chimica Acta*, 483(1–2), 73–79. https://doi.org/10.1016/S0003-2670(02)01405-8
20. Quintanilla, P., Beltrán, M. C., Molina, A., Escriche, I., Molina, M. P. (2019). Characteristics of ripened Tronchón cheese from raw goat milk containing legally admissible amounts of antibiotics. *Journal of Dairy Science*, 102(4), 2941–2953. https://doi.org/10.3168/jds.2018-15532
21. Gajda, A., Nowacka-Kozak, E., Gbylik-Sikorska, M., Posyniak, A. (2018). Tetracycline antibiotics transfer from contaminated milk to dairy products and the effect of the skimming step and pasteurisation process on residue concentrations. *Food Additives and Contaminants: Part A*, 35(1), 66–76. https://doi.org/10.1080/19440049.2017.1397773
22. Hakk, H., Shappell, N. W., Lupton, S. J., Shelver, W. L., Fanaselle, W., Oryang, D. et al. (2016). Distribution of animal drugs between skim milk and milk fat fractions in spiked whole milk: Understanding the potential impact on commercial milk products. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 64(1), 326–335. https://doi.org/10.1021/acs.jafc.5b04726
23. Ziv, G., Rasmussen, F. (1975). Distribution of labeled antibiotics in different components of milk following intramammary and intramuscular administrations. *Journal of Dairy Science*, 58(6), 938–946. https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(75)84660-1
24. Sniegocki, T., Gbylik-Sikorska, M., Posyniak, A. (2015). Transfer of chloramphenicol from milk to commercial dairy products — experimental proof. *Food Control*, 57, 411–418. https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2015.04.028
25. Cayle, T., Guth, J. H., Hynes, J. T., Kolen, E. P., Stern, M. L. (1986). Penicillin distribution during cheese manufacture and membrane treatment of whey. *Journal of Food Protection*, 49(10), 796–798. https://doi.org/10.4315/0362-028X-49.10.796
26. Shappell, N. W., Shelver, W. L., Lupton, S. J., Fanaselle, W., Doren, J. M., Hakk, H. (2017). Distribution of animal drugs among curd, whey, and milk protein fractions in spiked skim milk and whey. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 65(4), 938–949. https://doi.org/10.1021/acs.jafc.6b04258
27. Gbylik-Sikorska, M., Gajda, A., Nowacka-Kozak, E., Posyniak, A. (2021). The "force" of cloxacillin residue will be with you in various dairy products — The last experimental evidence. *Food Control*, 121, Article 107628. https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2020.107628
28. Lanyi, K., Darnay, L., Laszlo, N., Lehel, J., Friedrich, L., Győri, R. et al. (2022). Transfer of certain beta-lactam antibiotics from cow's milk to fresh cheese and whey. *Food Additives and Contaminants: Part A*, 39(1), 52–60. https://doi.org/10.1080/19440049.2021.1973114
29. Cabizza, R., Rubattu, N., Salis, S., Pes, M., Comunian, R., Paba, A. et al. (2017). Transfer of oxytetracycline from ovine spiked milk to whey and cheese. *International Dairy Journal*, 70, 12–17. https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2016.12.002
30. Cabizza, R., Rubattu, N., Salis, S., Pes, M., Comunian, R., Paba, A. et al. (2018). Impact of a thermisation treatment on oxytetracycline spiked ovine milk: Fate of the molecule and technological implications. *LWT*, 96, 236–243. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.05.026
31. Giraldo, J., Althaus, R. L., Beltrán, M. C., Molina, M. P. (2017). Antimicrobial activity in cheese whey as an indicator of antibiotic drug transfer from goat milk. *International Dairy Journal*, 69, 40–44. https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2017.02.003
32. Quintanilla, P., Beltrán, M. C., Molina, M. P., Escriche, I. (2021). Enrofloxacin treatment on dairy goats: Presence of antibiotic in milk and impact of residue on technological process and characteristics of mature cheese. *Food Control*, 123, Article 107762. https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2020.107762
33. Castrica, M., Rebucci, R., Giromini, C., Tretola, M., Cattaneo, D., Baldi, A. (2019). Total phenolic content and antioxidant capacity of agri-food waste and by-products. *Italian Journal of Animal Science*, 18(1), 336–341. https://doi.org/10.1080/1828051X.2018.1529544
34. Lupton, S. J., Shappell, N. W., Shelver, W. L., Hakk, H. (2018). Distribution of spiked drugs between milk fat, skim milk, whey, curd, and milk protein fractions: Expansion of partitioning models. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 66(1), 306–314. https://doi.org/10.1021/acs.jafc.7b04463
35. Cerkvenik, V., Perko, B., Rogelj, I., Doganoc, D. Z., Skubic, V., Beek, W. M. et al. (2004). Fate of ivermectin residues in ewes' milk and derived products. *Journal of Dairy Research*, 71(1), 39–45. https://doi.org/10.1017/S0022029903006381
36. Niu, C., Yan, M., Yao, Z., Dou, J. (2023). Antibiotic residues in milk and dairy products in China: Occurrence and human health concerns. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(53), 113138–113150. https://doi.org/10.1007/s11356-023-30312-2
37. Iezzi, S., Lifschitz, A., Sallovitz, J., Nejamkin, P., Lloberas, M., Manazza, J. et al. (2014). Closantel plasma and milk disposition in dairy goats: Assessment of drug residues in cheese and ricotta. *Journal of Veterinary Pharmacology and Therapeutics*, 37(6), 589–594. https://doi.org/10.1111/jvp.12135
38. Stefańska, I., Kwiecień, E., Jóźwiak-Piasecka, K., Garbowska, M., Binek, M., Rzewuska, M. (2021). Antimicrobial susceptibility of lactic acid bacteria strains of potential use as feed additives — the basic safety and usefulness criterion. *Frontiers in Veterinary Science*, 8, Article 687071. https://doi.org/10.3389/fvets.2021.687071
39. Yilmaz, N., Ozogul, Y., Dağgeçen, E. C., Akyol, I., Rathod, N. B., Surasani, V. K. R. et al. (2025). Isolation, characterization and antibiotic resistance of lactic acid bacteria from dairy and seafood sources. *Food Bioscience*, 64, Article 105895. https://doi.org/10.1016/j.fbio.2025.105895
40. Hamdaoui, N., Benkirane, C., Bouaamali, H., Azghar, A., Mouncif, M., Maleb, A. et al. (2024). Investigating lactic acid bacteria genus *Lactococcus lactis* properties: Antioxidant activity, antibiotic resistance, and antibacterial activity against multidrug-resistant bacteria *Staphylococcus aureus*. *Heliyon*, 10(11), Article e31957. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e31957
41. Floris, I., Battistini, R., Tramuta, C., Garcia-Vozmediano, A., Musolino, N., Scardino, G. et al. (2025). Antibiotic resistance in lactic acid bacteria from

dairy products in Northern Italy. *Antibiotics*, 14(4), Article 375. https://doi.org/10.3390/antibiotics14040375
42. Dec, M., Nowaczek, A., Stępień-Pyśniak, D., Wawrzykowski, J., Urban-Chmiel, R. (2018). Identification and antibiotic susceptibility of lactobacilli isolated from turkeys. *BMC Microbiology*, 18(1), Article 168. https://doi.org/10.1186/s12866-018-1269-6
43. Erginkaya, Z., Turhan, E. U., Tatlı, D. (2018). Determination of antibiotic resistance of lactic acid bacteria isolated from traditional Turkish fermented dairy products. *Iranian Journal of Veterinary Research*, 19(1), 53–56.
44. Dec, M., Stępień-Pyśniak, D., Nowaczek, A., Puchalski, A., Urban-Chmiel, R. (2020). Phenotypic and genotypic antimicrobial resistance profiles of fecal lactobacilli from domesticated pigeons in Poland. *Anaerobe*, 65, Article 102251. https://doi.org/10.1016/j.anaerobe.2020.102251
45. Duche, R. T., Singh, A., Wandhare, A. G., Sangwan, V., Sihag, M. K., Nwagu, T. N. et al. (2023). Antibiotic resistance in potential probiotic lactic acid bacteria of fermented foods and human origin from Nigeria. *BMC Microbiology*, 23(1), Article 142. https://doi.org/10.1186/s12866-023-02883-0
46. Obioha, P. I., Anyogu, A., Awamaria, B., Ghoddusi, H. B., Ouoba, L. I. I. (2023). Antimicrobial resistance of lactic acid bacteria from Nono, a naturally fermented milk product. *Antibiotics*, 12(5), Article 843. https://doi.org/10.3390/antibiotics12050843
47. Grujović, M. Ž., Marković, K. G., Morais, S., Semedo-Lemsaddek, T. (2024). Unveiling the potential of lactic acid bacteria from Serbian goat cheese. *Foods*, 13(13), Article 2065. https://doi.org/10.3390/foods13132065
48. Kiani, A., Nami, Y., Barghi, A., Salehian, M., Goudarzi, F., Haghshenas, B. (2025). Synergistic antimicrobial and probiotic activity of lactic acid bacteria isolated from Tarkhineh against *Candida albicans*. *Scientific Reports*, 15, Article 20651. https://doi.org/10.1038/s41598-025-07549-7
49. Anisimova, E., Gorokhova, I., Karimullina, G., Yarullina, D. (2022). Alarming antibiotic resistance of lactobacilli isolated from probiotic preparations and dietary supplements. *Antibiotics*, 11(11), Article 1557. https://doi.org/10.3390/antibiotics11111557
50. Nalepa, B., Markiewicz, L. H. (2022). Microbiological biodiversity of regional cow, goat and ewe milk cheeses produced in poland and antibiotic resistance of lactic acid bacteria isolated from them. *Animals*, 13(1), Article 168. https://doi.org/10.3390/ani13010168
51. Li, X., Li, W., Zhao, L., Li, Y., He, W., Ding, K., Cao, P. (2024). Characterization and assessment of native lactic acid bacteria from broiler intestines for potential probiotic properties. *Microorganisms*, 12(4), Article 749. https://doi.org/10.3390/microorganisms12040749
52. Reuben, R. C., Roy, P. C., Sarkar, S. L., Alam, R. U., Jahid, I. K. (2019). Isolation, characterization, and assessment of lactic acid bacteria toward their selection as poultry probiotics. *BMC Microbiology*, 19, Article 253. https://doi.org/10.1186/s12866-019-1626-0
53. Dowarah, R., Verma, A. K., Agarwal, N., Singh, P., Singh, B. R. (2018). Selection and characterization of probiotic lactic acid bacteria and its impact on growth, nutrient digestibility, health and antioxidant status in weaned piglets. *PloS One*, 13(3), Article e0192978. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0192978
54. Escobar, G. D., Pelaggio, R., Cardozo, G., Moreno, S., De Torres, E., Rey, F. et al. (2023). Transfer of β-lactam and tetracycline antibiotics from spiked bovine milk to Dambo-type cheese, whey, and whey powder. *Food Additives and Contaminants: Part A*, 40(7), 824–837. https://doi.org/10.1080/19440049.2023.2220427
55. Fodor, A., Cseppento, D. C. N., Badea, G. E., Petrehele, A. I., Groze, A., Tit, D. M. et al. (2023). Colloidal gold immunochromatography and ELISA traceability of tetracycline residues from raw milk to its dairy products. *In Vivo*, 37(4), 1619–1627. https://doi.org/10.21873/invivo.13247
56. Lanyi, K., Darnay, L., Laszlo, N., Lehel, J., Friedrich, L., Győri, R. et al. (2021). Transfer of certain beta-lactam antibiotics from cow's milk to fresh cheese and whey. *Food Additives and Contaminants: Part A*, 39(1), 52–60. https://doi.org/10.1080/19440049.2021.1973114

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ	AUTHOR INFORMATION
Принадлежность к организации	**Affiliation**
Свириденко Галина Михайловна — доктор технических наук, Всероссийский научно-исследовательский институт маслоделия и сыроделия 152613, Ярославская область, Углич, Красноармейский бульвар, 19 E-mail: sg_microbiology@mail.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9586-3786	**Galina M. Sviridenko**, Doctor of Technical Sciences, All-Russian Scientific Research Institute of Butter- and Cheesemaking 19, Krasnoarmeysky Boulevard, Uglich, 152613, Yaroslavl Region, Russia E-mail: sg_microbiology@mail.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9586-3786
Захарова Марина Борисовна — кандидат технических наук, научный сотрудник, отдел микробиологических исследований, Всероссийский научно-исследовательский институт маслоделия и сыроделия, 152613, Ярославская область, Углич, ул. Красноармейский бульвар, 19 E-mail: m.zakharova@fncps.ru ORCID: http://orcid.org/0000-0002-2537-4522	**Marina B. Zakharova**, Candidate of Technical Sciences, Researcher, Department of Microbiological Research, All-Russian Scientific Research Institute of Butter- and Cheesemaking 19, Krasnoarmeysky Boulevard, Uglich, 152613, Yaroslavl Region, Russia E-mail: m.zakharova@fncps.ru ORCID: http://orcid.org/0000-0002-2537-4522
Мамыкин Денис Станиславович — кандидат технических наук, научный сотрудник, отдел микробиологических исследований, Всероссийский научно-исследовательский институт маслоделия и сыроделия 152613, Ярославская область, Углич, Красноармейский бульвар, 19 E-mail: d.mamykin@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2145-1439 * автор для контактов	**Denis S. Mamykin**, Candidate of Technical Sciences, Researcher, Department of Microbiological Research, All-Russian Scientific Research Institute of Butter- and Cheesemaking 19, Krasnoarmeysky Boulevard, Uglich, 152613, Yaroslavl Region, Russia E-mail: d.mamykin@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2145-1439 * corresponding author
Критерии авторства	**Contribution**
Концептуализация — **Свириденко Г. М.** Методология — **Свириденко Г. М.** и **Захарова М. Б.** Исследование — **Захарова М. Б.** и **Мамыкин Д. С.** Обработка и анализ данных — **Мамыкин Д. С.** Написание статьи и редактирование — **Свириденко Г. М.**, **Захарова М. Б.** и **Мамыкин Д. С.** Авторы в равных долях имеют отношение к написанию рукописи и одинаково несут ответственность за плагиат.	Conceptualization — **Galina M. Sviridenko**; methodology — **Galina M. Sviridenko**, **Marina B. Zakharova**; investigation — **Marina B. Zakharova**, **Denis S. Mamykin**; data curation and analysis — **Denis S. Mamykin**; writing-article and editing — **Galina M. Sviridenko**, **Marina B. Zakharova**, **Denis S. Mamykin**; Authors equally relevant to the writing of the manuscript, and equally responsible for plagiarism.
Конфликт интересов	**Conflict of interest**
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.	The authors declare that there is no conflict of interest.

DOI: https://doi.org/10.21323/2618-9771-2026-9-2-208-215

Поступила 21.01.2026
Поступила после рецензирования 07.05.2026
Принята в печать 12.05.2026
© Панкратов И. В., Куликов Д. С., Королев А. А., Калугина З. И., Буданов А. В., 2026

https://www.fsjour.com/jour
Научная статья
Открытый доступ

БИОХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА СУБЛИМИРОВАННОГО СОКА И ВЫЖИМКИ РОСТКОВ ПШЕНИЦЫ ИЗ ЗЕРНА СОРТА «ЮБИЛЕЙНАЯ 60»

Панкратов И. В., Куликов Д. С.*, Королев А. А., Калугина З. И., Буданов А. В.

Всероссийский научно-исследовательский институт технологии консервирования, Видное, Московская область, Россия

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:
витграсс, сушка, аминокислотный состав, углеводный состав, жирнокислотный состав, перевариваемость, биологическая ценность

АННОТАЦИЯ

Цель работы — определение биохимического состава сублимированного сока и выжимки ростков пшеницы из зерна современного сорта «Юбилейная 60». В ходе исследований установлено, что сок обладал насыщенным зеленым цветом, травянистым запахом и сладким вкусом, а также содержал в пересчете на сухие вещества (СВ) 70,37 % азотистых веществ, 17,87 % углеводов, 7,95 % золы и 3,81 % жира. Содержание общих аминокислот сока составляло 37,35 % в пересчете на СВ, из которых 14,24 % — незаменимые. Аминокислотный скор белков сока — 109–190 %, перевариваемость — 70,62 %, PDCAAS — 0,77 ед. Углеводы сока состояли из глюкозы (52,95 %), высокомолекулярных соединений (ВМС — 32,52 %), фруктозы (7,04 %), сахарозы (3,07 %), мальтотриозы (2,28 %) и мальтозы (2,14 %). Липиды сока состояли из насыщенных (НЖК — 64,66 %), мононенасыщенных (МНЖК — 24,10 %) и полиненасыщенной (линолевой — 11,24 %) жирных кислот. Выжимка ростков обладала светло-зеленым цветом, травянистым запахом, свойственным целлюлозе вкусом со сладковатым послевкусием и содержала (в пересчете на СВ): 67,66 % углеводов, 27,77 % азотистых веществ, 3,17 % жира и 1,40 % золы. Содержание общих аминокислот в выжимке (в пересчете на СВ) составляло 26,91 %, незаменимых аминокислот — 12,71 %, аминокислотный скор — 115–250 %, перевариваемость — 47,05 %, PDCAAS — 0,54 ед. Углеводы выжимки содержали глюкозу (43,53 %), ВМС (40,15 %), фруктозу (9,80 %), сахарозу (3,81 %), мальтозу (1,40 %) и мальтотриозу (1,31 %). Липиды выжимки содержали НЖК (71,56 %), МНЖК (17,91 %) и линолевую кислоту (10,53 %). Полученные результаты свидетельствуют о значительном увеличении биологической ценности белков сублимированного сока и выжимки ростков по сравнению с непроросшим зерном, что позволяет рекомендовать их для использования в качестве биологически активной добавки к пище. В частности, к продуктам спортивного питания, напиткам и коктейлям на растительной основе, кондитерским, хлебобулочным, макаронным изделиям и другим продуктам.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Статья подготовлена в рамках выполнения исследований по государственному заданию № FGUS-2024–0006 Федерального научного центра пищевых систем им. В. М. Горбатова Российской академии наук.

Received 21.01.2026
Accepted in revised 07.05.2026
Accepted for publication 12.05.2026
© Pankratov I. V., Kulikov D. S., Korolev A. A., Kalugina Z. I., Budanov A. V., 2026

Available online at https://www.fsjour.com/jour
Original scientific article
Open access

BIOCHEMICAL CHARACTERISTICS OF WHEAT SPROUT SUBLIMATED JUICE AND POMACE FROM THE GRAIN OF THE “YUBILEINAYA 60” VARIETY

Igor V. Pankratov, Denis S. Kulikov*, Aleksey A. Korolev, Zoya I. Kalugina, Andrey V. Budanov

Russian Research Institute of Canning Technology, Vidnoe, Moscow region, Russia

KEYWORDS:
wheatgrass, drying, amino acid composition, carbohydrate composition, fatty acid composition, digestibility, biological value

ABSTRACT

The aim of the work was to determine the biochemical composition of wheat sprout freeze-dried juice and pomace from grain of the modern variety “Yubileinaya 60”. The study revealed that the juice had a rich green color, herbaceous aroma, and sweet taste. Its composition (on a dry matter basis) included 70.37 % nitrogenous substances, 17.87 % carbohydrates, 7.95 % ash, and 3.81 % fat. The total amino acid content of the juice was 37.35 % on a dry matter basis, of which 14.24 % were essential. The amino acid score of juice proteins was 109–190 %, digestibility was 70.62 %, and PDCAAS was 0.77 units. The carbohydrates in the juice consisted of glucose (52.95 %), high molecular weight compounds (HMWC — 32.52 %), fructose (7.04 %), sucrose (3.07 %), maltotriose (2.28 %) and maltose (2.14 %). The lipids in the juice consisted of saturated (SFA — 64.66 %), monounsaturated (MUFA — 24.10 %) and polyunsaturated (linoleic — 11.24 %) fatty acids. The sprout pomace had a light green color, herbaceous aroma, taste characteristic of cellulose with a sweetish aftertaste and contained (on a dry matter basis) 67.66 % carbohydrates, 27.77 % nitrogenous substances, 3.17 % fat and 1.40 % ash. The content of total amino acids in the pomace (on a dry matter basis) was 26.91 %, essential amino acids — 12.71 %, amino acid score — 115–250 %, digestibility — 47.05 %, PDCAAS — 0.54 units. The carbohydrates of the pomace contained glucose (43.53 %), HMWC (40.15 %), fructose (9.80 %), sucrose (3.81 %), maltose (1.40 %) and maltotriose (1.31 %). The lipids of the pomace contained SFA (71.56 %), MUFA (17.91 %) and linoleic acid (10.53 %). The results obtained demonstrate a significant increase in the biological value of proteins in sprouted grain freeze-dried juice and pomace compared to unsprouted grain, making them suitable for use as dietary supplements. Specifically, these supplements can be used in sports nutrition products, plant-based drinks and cocktails, confectionery, bakery products, pasta, and other products.

FUNDING: The article was prepared as part of the research under the state assignment No. FGUS-2024–0006 of the V. M. Gorbatov Federal Research Center for Food Systems of the Russian Academy of Sciences.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: **Панкратов, И. В., Куликов, Д. С., Королев, А. А., Калугина, З. И., Буданов, А. В.** (2026). Биохимическая характеристика сублимированного сока и выжимки ростков пшеницы из зерна сорта «Юбилейная 60». *Пищевые системы*, 9(2), 208–215. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2026-9-2-208-215

FOR CITATION: **Pankratov, I. V., Kulikov, D. S., Korolev, A. A., Kalugina, Z. I., Budanov, A. V.** (2026). Biochemical characteristics of wheat sprout sublimated juice and pomace from the grain of the “Yubileinaya 60” variety. *Food Systems,* 9(2), 208–215. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2026-9-2-208-215

1. Введение

Современные тенденции улучшения качества продуктов питания обуславливают актуальность разработки пищевых систем, обогащенных биологически активными веществами. Пшеница (*Triticum aestivum* L.) является одной из ведущих зерновых культур России, а ее глубокая переработка позволяет получать продукты со сниженной аллергенностью, повышенной усвояемостью и высоким содержанием биологически активных веществ [1–3]. К таким продуктам относят, в частности, белковые гидролизаты, пептиды и аминокислоты [4,5], а также зародыши пшеницы, богатые витаминами [6], фенольными соединениями, минеральными веществами [7] и полиненасыщенными жирными кислотами [8]. Перспективным методом увеличения биологической ценности пшеницы также является ее проращивание с последующим отделением ростков, называемых «витграсс» (от англ. *wheatgrass* — «трава пшеницы») [9,10]. Ростки пшеницы содержат большое количество витаминов (C, E, K, B1, B2, B3, B9), незаменимых аминокислот (лейцин, валин, фенилаланин, метионин, лизин, гистидин, изолейцин, треонин, триптофан) и β-каротина [9–11]. Ростки богаты минеральными веществами (кальций, железо, калий, натрий, магний) [11,12], флавоноидами (катехин, рутин, витексин и изовитексин) [13,14], хлорофиллом [15,16], ферментами [17] и другими соединениями, полезными для организма. Путем отжима ростков пшеницы получают сок, который эффективен для профилактики заболеваний пищеварительной системы, ожирения и интоксикации организма [10,16,18]. Сок из ростков также полезен для профилактики сахарного диабета, синдрома хронической усталости, преждевременного старения, анемии, артрита, гипоксии, ишемического инсульта, язвенного колита, атеросклероза, различных видов рака и мукозитов [19–21].

Установлено, например, что сок ростков пшеницы обладал стимулирующим воздействием на рост и биохимическую активность культур лакто- и бифидобактерий, используемых в производстве пробиотических лекарственных препаратов для нормализации кишечной микрофлоры [10]. В другом исследовании обнаружено протекторное воздействие сока ростков пшеницы на функции почек крыс с индуцированным стрептозотоцином сахарным диабетом второго типа, так как при замене воды в рационе животных на 3%-ный раствор сока ростков пшеницы наблюдалось снижение количества эритроцитов в моче [19]. В данной работе также был продемонстрирован антигипоксический эффект сока: у мышей, находившихся в герметичных условиях, продолжительность жизни увеличилась на 17,6% по сравнению с контрольной группой. Показано увеличение уровня тестостерона на 42% у самцов крыс-альбиносов, ежедневно получавших 11 мг сока ростков пшеницы в составе корма; данный эффект был сопоставим с показателями группы животных, рацион которых был обогащен цинком и витамином A [22]. Комбинация флуоксетина и экстракта ростков пшеницы (10 и 100 мг/кг массы тела соответственно), по сравнению с использованием одного флуоксетина, приводила к увеличению эффективности лечения у крыс болезни Альцгеймера, индуцированной хлоридом алюминия [23].

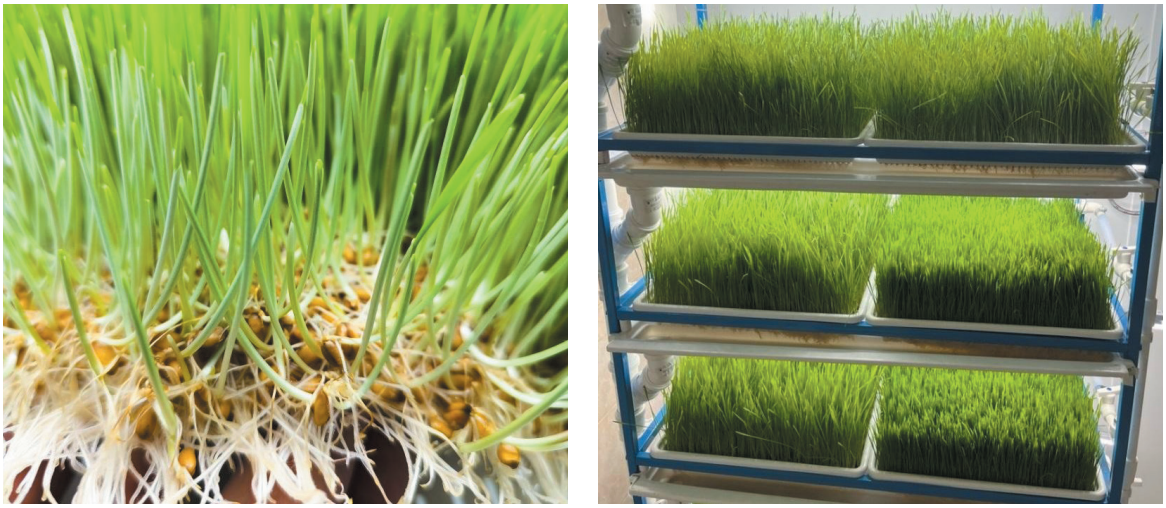
Иммуномодулирующие и противовоспалительные эффекты ежедневного потребления 20 мл сока ростков пшеницы из зерна якутских сортов «Туймаада» и «Приленская-9» были зафиксированы в ходе клинико-иммунологических исследований с участием 27 женщин [24]. Установлено, что после 24 суток приема сока ростков в крови женщин наблюдалось увеличение количества лимфоцитов (на 17%), моноцитов, эозинофилов и базофилов (на 40%), а также снижение скорости оседания эритроцитов (на 46%) с сохранением процесса гомеостаза и отсутствием негативного влияния на остальные показатели. Повышение уровня гемоглобина в среднем на 27,88% по сравнению с контрольной группой было зафиксировано в крови у 30 девочек-подростков, страдающих анемией, при приеме 30 мл сока из ростков пшеницы утром натощак в течение 60 дней [25].

Высокое содержание нестабильных микронутриентов существенно ограничивает срок годности сока из ростков пшеницы [9,26,27]. Так, если хранение сока при температуре 4 ± 2 °C ограничивается 6 сутками с минимальными потерями сухих веществ, витаминов и органолептических характеристик, то шоковая заморозка и хранение сока при температуре минус 18 ± 2 °C продлевало сохранность данных показателей до 3 недель [12]. Термическая обработка сока при температуре 75 °C в течение 15 секунд приводила к изменению цвета и снижению содержания фенольных соединений (на 36%), витамина C (на 27,4%), хлорофилла (на 12,4%) и активности ферментов (на 40,0–75,3%) [27]. Обработка ультрафиолетовым излучением (длина волны 254 нм, плотность потока 69,2 мДж/см^2) снижала содержание фенольных соединений и активность ферментов сока на 20% [27]. При обработке сока высоким гидростатическим давлением (HPP) в 500 МПа в течение 60 секунд достоверно не было выявлено снижения содержания и активности полезных веществ. Более того, данный метод позволил увеличить содержание хлорофилла в соке на 9%. Поэтому с целью увеличения продолжительности хранения и сохранения биологических свойств сока требуется реализовывать его несколькими способами: в замороженном виде, с использованием HPP, консервантов или высушивания сублимацией с последующим измельчением в порошок и таблетированием. Метод сублимационной сушки позволяет получить продукт с низкой влажностью (до 5%), сохранностью исходного уровня антиоксидантной активности и высоким количеством биологически активных веществ, таких как хлорофилл, флавоноиды и сапонины [28].

Следует отметить, что различные сорта пшеницы отличаются по нутриентному составу и биологическим свойствам получаемого сока ростков [13,15,29]. Например, при исследовании сока ростков пшеницы из двух сортов твердого зерна (HD-3086, C-306), одного мягкого (HS-490) и одного средней твердости (HD-296) выявлена существенная разница в содержании золы (в 3 раза), флавоноидов (в 2,3 раза), хлорофилла (на 87%), белка (на 29,5%) и антиоксидантной активности (на 28%) [13]. Самые высокие показатели антиоксидантной активности, содержания незаменимых аминокислот, магния и хлорофилла демонстрировал сок из твердых сортов пшеницы. В другой работе было изучено содержание белка, магния, железа и цинка в соке из ростков 93 генотипов пшеницы [30]. Установлено, что количество белка в образцах сока различалось в 3,86 раза между генотипами *Triticum spelta* и *Ravenna*; содержание магния — в 1,97 раза между сортами *Katarina* и *Soissons*; железа — в 1,99 раза между *Lutescens* 8 и *Žitarka*; цинка — в 1,76 раза между сортами *Dekan*, *NS Rana 5* и *Apache*. При исследовании сока из белого (PBW621) и цветных сортов пшеницы (фиолетовая — NABIMG-10, синяя — NABIMG-9, черная — NABIMG-11) установлено, что сок цветных сортов содержал в 6,5 раза больше антоцианов, а также на 30,5% больше хлорофилла, на 87,5% — растворимых фенолов и на 10,2% — белков; антиоксидантная активность при этом была выше на 112,5% [31]. Наибольшее содержание антоцианов (72,26 мг/кг), а также высокий уровень ингибирования 2,2-дифенил-1-пикрилгидразила (DPPH — 70,19%) и 2,2'-азино-бис (3-этилбензотиазолин-6-сульфоновой кислоты) (ABTS — 51,40%) наблюдались в соке из ростков черной пшеницы, далее по убыванию следовали соки из ростков синей и фиолетовой пшеницы [32]. Наименьшее количество антоцианов (8,88 мг/кг) с самым низким уровнем ингибирования DPPH (42,46%) и ABTS (24,18%) было обнаружено в соке из ростков белой пшеницы.

Среди современных российских сортов пшеницы высокой перспективностью получения сока обладает сорт «Юбилейная 60» из коллекции ФГБНУ «ФИЦ Немчиновка». Данный сорт районирован в Центральном и Северо-Западном регионах и отличается высокими показателями ростовых характеристик (высота растения — 100,2 см, длина колоса — 10,5 см), урожайности (11–12 т/га) и фитосанитарного потенциала. Сорт относится к группе высокоустойчивых и характеризуется высокой резистентностью к бурой ржавчине и септориозу, а также средней устойчивостью к мучнистой росе. Масса 1000 зерен равна 55,1 г, содержание белка составляет 15,38–16,30% — эти показатели позволяют отнести зерно к 1 классу продовольственной пшеницы [33–35].

В качестве источника биологически активных веществ интерес представляет и побочный продукт производства сока — выжимка, являющаяся остатком после процесса отжима и состоящая преимущественно из пищевых волокон. Среди литературных данных указанному вторичному продукту внимания практически не уделяется. Известно, например, что выжимка после отжима сока из ростков пшеницы содержит (на 100 г): 74 г влаги, 13 г клетчатки, 5,5 г белка, 4 г липидов, 1 г органических кислот, 0,5 г минеральных веществ, 370 мг танинов, 200 мг флавоноидов и 130 мг витамина C [2]. Поэтому исследование выжимки ростков пшеницы перспективного сорта «Юбилейная 60» представляет актуальность в контексте выявления возможных направлений ее реализации в пищевой промышленности. К тому же, в научной литературе отсутствуют сведения о биологической ценности белков сока и выжимки ростков пшеницы с учетом аминокислотного скора и усвояемости (PDCAAS), что является ключевой характеристикой качества белков. В связи с этим цель работы — определение биохимического состава сублимированного сока и выжимки ростков пшеницы из зерна сорта «Юбилейная 60».



a b

Рисунок 1. **Внешний вид ростков пшеницы после 5 (a) и 10 (b) суток проращивания**
Figure 1. **Appearance of wheatgrass after 5 (a) and 10 (b) days of germination**

2. Объекты и методы

2.1. Подготовка образцов

Объектами исследований явились сок и выжимка, полученные путем отжима ростков пшеницы. Зерно пшеницы (*Triticum aestivum L.*) сорта «Юбилейная 60» из коллекции ФГБНУ «ФИЦ Немчиновка» выращивали по гидропонному методу на установке «Ангара ГС-250» («Русская гидропоника», Россия) с соблюдением параметров температуры (18–20 °C), влажности (50–65 %), вентиляции (легкий обдув с вытяжкой) и искусственного освещения (холодный белый спектр 6500 К с интервалами в 12 часов). Полив осуществляли методом подтопления с интервалами в 12 часов. Продолжительность выращивания составляла 10 суток до достижения высоты ростков 12–14 см (Рисунок 1).

После проращивания ростки пшеницы срезали и помещали в шнековую соковыжималку собственной разработки, состоящую из мотора-редуктора NMRV090-10-90-2.2-B3/A100-1, преобразователя частоты INNOVERT ITD222U21B2 и ручной шнековой соковыжималки BL-30. Отжим сока проводился в холодном режиме при скорости вращения шнека 50 об/мин. Полученный сок и выжимку высушивали на сублимационной сушилке LAB 3 (Lyomachines, Россия) с последующим измельчением в порошок. Перед сушкой образцы предварительно замораживали при температуре минус 30 °C до полного перехода влаги в кристаллическое состояние. Этап сублимационной сушки проводили при остаточном давлении 100 Па, обеспечивающем эффективное удаление льда за счет сублимации. Температуру полок поддерживали на уровне не выше 40 °C до достижения остаточного содержания влаги не более 5 %. Температуру продукта контролировали с использованием термопар, установленных в толще слоя материала, что позволяло предотвращать его перегрев и обеспечивать воспроизводимость режимов сушки. Общая продолжительность процесса сублимационной сушки, включая стадию замораживания образцов, составляла 24 часа.

2.2. Определение органолептических показателей образцов

Внешний вид, цвет, запах и вкус свежевыжатого сока, а также образцов сублимированного сока и выжимки оценивали 5 сотрудников ВНИИТеК (3 сотрудника лаборатории процессов и оборудования консервного производства и 2 сотрудника научно-исследовательского испытательного центра) по ГОСТ 8756.1-2017[1] с использованием описательного метода (п. 5.5.9.1).

2.3. Определение химического состава образцов

Массовую долю влаги в высушенных и измельченных образцах определяли по ГОСТ 13586.5-2015[2]; белка — по ГОСТ 10846-91[3] с коэффициентом пересчета общего азота на белок Nx5,7; золы — по ГОСТ 27494-2016[4]; жира — по ГОСТ 29033-91[5]; углеводов — по разнице между 100 % и суммой остальных компонентов.

2.4. Определение аминокислотного состава, скора, перевариваемости и биологической ценности белков образцов

Аминокислотный состав образцов определяли методом высокоэффективной жидкостной хроматографии с постколоночной дериватизацией нингидрином по ГОСТ 32195-2013[6]. Пробоподготовка заключалась в предварительном окислении образцов смесью муравьиной кислоты и 30 % перекиси водорода (соотношение 9:1) продолжительностью 1 час по ОФС.1.2.1.0025.18[7] (метод 4). Данный этап проводили для перевода аминокислот метионина и цистеина в окисленную форму и их последующей идентификации. Гидролиз образцов проводили в растворе 6Н HCl при температуре 110 °C в течение 24 часов. Полученный гидролизат нейтрализовывали раствором 7,5Н NaOH до pH 2,2 ± 0,1 и разбавляли буферным раствором. Анализ проводили на жидкостном хроматографе LC-20 Prominence (Shimadzu, Япония), состоящим из насоса LC-20AD (Shimadzu, Япония), автосамплера SIL-20A (Shimadzu, Япония) и спектрофотометрического детектора SPD-20A (Shimadzu, Япония). Система была оснащена колонкой для ионообменной хроматографии ТВЕС.414538.005-01 (150 × 4,6 мм, СТ/ДВБ, 7 мкм 10 % Na+ (Sevko, Россия)), фильтром-поглотителем аммиака ТВЕС.414538.005–02 (100 × 4,6 мм СТ/ДВБ, 50 мкм, 10 % (Sevko, Россия)) и постколоночным реактором для дериватизации аминокислот нингидрином АРМ-1000Н/НТ (Sevko, Россия). Обработку хроматограмм выполняли с помощью программного обеспечения Shimadzu LC Solution 2.0. В процессе кислотного гидролиза образцов триптофан разрушался и не учитывался в расчете аминокислотного состава, скора и биологической ценности белков образцов. Для определения количественного содержания аминокислот в образцах в тех же условиях проводили анализ стандартного образца смеси семнадцати аминокислот с известной концентрацией (Н-ОХ, Sevko, Россия).

Перевариваемость белков методом *in vitro* с использованием раствора пепсина («ЛенРеактив», Россия) концентрацией 1 мг/см^3 при pH 1,8 ± 0,1 и раствора трипсина («Самсон-Мед», Россия) концентрацией 0,5 мг/см^3 при pH 8,4 ± 0,1 определяли согласно протоколу Покровского–Ертанова [36]. Для расчета аминокислотного скора устанавливали содержание каждой незаменимой аминокислоты в 1 грамме белка исследуемых образцов и сопоставляли с содержанием соответствующих аминокислот в 1 грамме «идеального» белка, рекомендуемого ФАО/ВОЗ 2011 г [37]. Биологическую ценность белков образцов (PDCAAS), рассчитанную как произведение значений аминокислотного скора лимитирующей аминокислоты и степени перевариваемости белков, определяли по методике ФАО/ВОЗ 2011 г [37].

[1] ГОСТ 8756.1-2017. «Продукты переработки фруктов, овощей и грибов. Методы определения органолептических показателей, массовой доли составных частей, массы нетто или объема». — М.: Стандартинформ, 2019. — 17 с.
[2] ГОСТ 13586.5-2015. «Зерно. Метод определения влажности». — М.: Стандартинформ, 2019. — 17 с.
[3] ГОСТ 10846-91. «Зерно и продукты его переработки. Метод определения белка». — М.: Стандартинформ, 2009. — 9 с.
[4] ГОСТ 27494-2016. «Мука и отруби. Методы определения зольности». — М.: Стандартинформ, 2019. — 16 с.
[5] ГОСТ 29033-91. «Зерно и продукты его переработки. Метод определения жира». — М.: ИПК Издательство стандартов, 2004. — 6 с.
[6] ГОСТ 32195-2013. «Корма, комбикорма. Метод определения содержания аминокислот». — М.: Стандартинформ, 2020. — 24 с.
[7] ОФС.1.2.1.0025.18. «Аминокислотный анализ». — М.: Государственная фармакопея Российской Федерации, 2018. — 35 с.

2.5. Определение углеводного состава образцов

Углеводный состав образцов определяли методом высокоэффективной жидкостной хроматографии. Процесс осуществляли на анализаторе, состоящем из рефрактометрического детектора HPLC Detector RI 8120 (Bischoff, Германия), насоса HPLC Compact pump Model 3350 (Bischoff, Германия), термостата для колонки CHX 700 (Pickering Laboratories, США), предколонки ReproGel Na 9 мкм, 4,6 × 10 (Dr. Maisch, Германия) и колонки ReproGel Na 9 мкм, 8 × 300 (Dr. Maisch, Германия).

2.6. Определение жирнокислотного состава образцов

Жирнокислотный состав образцов проводился газохроматографическим методом по ГОСТ 30418-96[8]. Жир из анализируемых проб выделяли методом Сокслета. Навеску массой 10–15 г экстрагировали гексаном в течение 4 часов на аппарате для экстракции Behr R 106T-S (Behr Labor-Technik, Германия). Полученный экстракт отгоняли на ротационном испарителе IKA RV-3 ECO (IKA-Werke, Германия) при температуре 50 °C. Из масляного остатка в круглодонной колбе отбирали 0,1 см^3 масла и растворяли в 5 см^3 гексана. В полученный раствор добавляли 0,04 см^3 метилата натрия в метаноле с молярной концентрацией 2 моль/см^3. После интенсивного перемешивания в течение 2 минут реакционную смесь центрифугировали в течение 15 минут при температуре 4 °C. Верхний слой анализировали на газовом хроматографе «Хроматэк-Кристалл 5000» («Хроматэк», Россия) с пламенно-ионизационном детектором. Использовали капиллярную колонку RTX-2330 (105 м × 0,25 мм × 0,2 мкм). Температурный режим термостата колонок составлял 125 °C с выдержкой 5 минут, далее температуру повышали со скоростью 4 °C/мин до 250 °C с последующей выдержкой 10 минут; температура детектора составляла 260 °C. В качестве газа-носителя использовали азот высокой чистоты (марка «6,0») со скоростью потока 20 см^3/мин. Внутренним стандартом служили наборы жирных кислот (Supelco, США).

2.7. Статистический анализ экспериментальных данных

Все исследования проводили в трехкратных повторностях. Полученные числовые результаты представляли в виде среднего арифметического с использованием стандартного отклонения, рассчитанного с критерием Стьюдента при уровне значимости $p \leqslant 0{,}05$.

3. Результаты и обсуждение

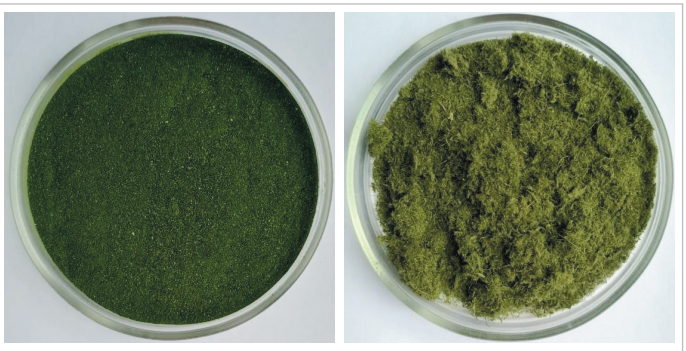
3.1. Органолептические показатели образцов

При анализе актуальных литературных источников не обнаружено исследований, в которых проводилась органолептическая оценка сублимированных или высушенных образцов сока пшеницы.

Свежевыжатый сок обладал органолептическими характеристиками (внешний вид, цвет, запах, вкус), совпадающими с результатами исследования [12]. После сушки сублимированный образец сока из ростков пшеницы представлял собой однородный мелкодисперсный порошок и имел насыщенный зеленый цвет, что являлось следствием высокого содержания хлорофилла (Рисунок 2). Образец обладал ярко выраженным травянистым запахом, свойственным продукту, и сладким вкусом.

Существуют исследования по сравнительной оценке органолептических свойств сока из ростков пшеницы, с соком из ростков других культур. Например, сок из ростков пшеницы по органолептическим свойствам (внешний вид/цвет, запах, интенсивность аромата, вкус, консистенция, общее впечатление), оцененным по пятибалльной шкале девятнадцатью неподготовленными участниками, получил средний балл 3,25. Соки из ростков ячменя и овса получили средние баллы 2,85 и 2,68 соответственно, что характеризует сок «витграсс» как наиболее предпочтительный [38]. Однако в другой работе исследование органолептических показателей по 9-балльной гедонистической системе оценки (где 9 — очень нравится, 1 — совершенно не нравится) выявило, что сок из ростков пшеницы имел более низкую среднюю оценку цвета (6,33), запаха (6,51), сладости (6,49) и общего впечатления (6,47), но высокую кислость (6,35) по сравнению с аналогичными показателями сока из ростков ячменя (6,95; 6,97; 7,03; 6,93 и 6,15 соответственно) [39]. Подобные различия объясняются особенностью сорта исходного сырья и вкусовыми предпочтениями дегустаторов.

Также известно, что увеличение содержания порошка сублимированного сока из ростков пшеницы от 3 до 15 % изменяло цвет изготовляемых макаронных изделий от светло-зеленого до насыщенного зеленого [40]. При этом концентрация новой добавки до 9 % приводило к улучшению органолептических показателей по сравнению с контрольными изделиями. Добавление сока из ростков пшеницы в количестве 9 % в молочные продукты (молоко, сыр панир) и высушенного сока из ростков пшеницы в количестве 3 % в мясные продукты (куриные наггетсы и шарики) способствовало сохранению органолептических свойств на уровне, сопоставимом с контрольными образцами, и значительному увеличению их антиоксидантной активности [41].



a b

Рисунок 2. **Внешний вид сока (a) и выжимки (b) из ростков пшеницы**

Figure 2. **Appearance of juice (a) and pomace (b) from wheatgrass**

Сублимированная и измельченная выжимка ростков представляла собой однородные сыпучие целлюлозные волокна. Образец имел светло-зеленый цвет, травянистый запах и свойственный целлюлозе вкус со сладким послевкусием, что совпадает с органолептической характеристикой высушенной выжимки ростков, изученной в другой работе[9].

3.2. Химический состав образцов

Анализ химического состава образцов выявил высокие сорбционные свойства сублимированного сока, так как содержание влаги в нем после высушивания и измельчения оказалось в 3,61 раза выше по сравнению с сублимированной выжимкой (Таблица 1). Полученные результаты согласуются с данными исследования высушенного сока из ростков пшеницы, в котором содержание влаги составляло 9,36–14,05 % при проращивании зерна в воде [13]. Содержание белка и минеральных веществ (золы) в соке превышало аналогичный показатель у выжимки в 2,53–5,68 раза, что говорит о миграции преобладающего количества данных веществ в сок в процессе отжима. Высокое содержание белка в соке (70,37 % в пересчете на СВ) значительно превышает аналогичные показатели сублимированных соков из ростков белой и черной пшеницы индийских сортов (20 и 22 % соответственно), а также лиофилизированного порошка сока (21,87 % и 22,66 % в пересчете на СВ), изученных другими исследователями; кроме того, оно превышает содержание белка в зародыше пшеницы (27,85 %) [7,31,42]. В связи с этим поставлена задача изучить в полученных образцах сока и выжимки общее содержание аминокислот, так как метод Кьельдаля, который использовался нами для расчета содержания белка, определяет количество общих азотистых соединений, в том числе не белковой природы.

Таблица 1. **Химический состав образцов**

Table 1. **Chemical composition of the samples**

Показатель	Образец	
	Сок	Выжимка
Содержание влаги, %	15,15 ± 0,15^a	4,20 ± 0,11^b
Содержание белка, % на сухие вещества	70,37 ± 0,01^a	27,77 ± 0,25^b
Содержание золы, % на сухие вещества	7,95 ± 0,01^a	1,40 ± 0,06^b
Содержание жира, % на сухие вещества	3,81 ± 0,04^a	3,17 ± 0,07^b
Содержание углеводов, % на сухие вещества	17,87 ± 0,06^a	67,66 ± 0,38^b

Примечание: числовые данные представляют собой средние значения ± стандартное отклонение для группы $n = 3$; разными буквами обозначены статистически различающиеся значения между образцами ($p \leqslant 0{,}05$).

[8] ГОСТ 30418-96. «Масла растительные. Метод определения жирнокислотного состава». — Минск: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2001. — 7 с.

[9] Губаненко, Г. А., Наймушина, Л. В., Зыкова, И. Д., Речкина, Е. А. (2018). Аспекты применения порошка из выжимок проростков пшеницы для функциональных продуктов. *Инновации в пищевой биотехнологии: Сборник трудов Международного симпозиума*, Кемерово, 14–16 мая 2018 года, под общей редакцией А. Ю. Просекова. Кемерово: Кемеровский государственный университет, С. 426–431.

Содержание золы в сублимированном соке (7,95 %, СВ) соответствовало количеству золы в порошках соков из ростков четырех сортов пшеницы, выращенных гидропонным методом (5,18–8,34 % или 6,03–9,21 %, СВ). При этом оно было значительно ниже, чем в образцах высушенного сока, полученных при выращивании в почве (12,87–15,93 % и 14,68–17,20 %, СВ) и на кокосовой шелухе с питательным субстратом (11,58–15,79 % и 12,78–17,19 %, СВ) [13]. Количество жира в исследуемом сублимированном соке было меньше на 48,29 %, чем в лиофилизированном порошке сока [42], и в 2,08 раза — по сравнению с зародышами пшеницы (8,72 г/100 г или 7,90 %, СВ) [7].

Выжимка по сравнению с высушенным соком содержала в 3,79 раза больше углеводов, что делает его потенциальным пищевым ингредиентом, богатым пшеничными пищевыми волокнами, которые, как известно, нормализуют баланс кишечной микрофлоры и увеличивают частоту стула [43]. Результаты согласуются с работой по изучению количественного и качественного состава пищевых волокон высушенной выжимки ростков пшеницы из зерна другого сорта[10], где их содержание составило 45,24 г/100 г. Из них 24,01 г приходилось на лигнин, 14,91 г — на гемицеллюлозу, 5,29 г — на целлюлозу и 1,03 г — на пектиновые вещества. Содержание белка в исследуемой выжимке было выше по сравнению с выжимкой, полученной в другой работе [2], где оно составляло 5,56 г/100 г (21,39 %, СВ), однако содержание жира (3,96 г/100 г, 15,23 %, СВ) и золы (0,49 г/100 г, 1,89 %, СВ) оказалось ниже.

3.3. Аминокислотный состав, скор, перевариваемость и биологическая ценность белков образцов

Содержание общих аминокислот в сублимированном соке составило 317 мг/г или 37,35 % в пересчете на сухие вещества, что значительно меньше (на 46,92 %) количества белка (70,37 %, СВ), определенного методом Кьельдаля. Это свидетельствует о высоком содержании азотистых веществ небелковой природы, представляющих собой продукты незавершенного синтеза неорганических веществ и белков [44,45]. Несмотря на то, что содержание общих аминокислот в сублимированной выжимке (258 мг/г) было ниже, чем в соке, на 18,68 %, количество незаменимых аминокислот в исследуемых образцах практически совпадало (122 и 120 мг/г соответственно). При этом их доля по отношению к общим аминокислотам была выше на 25,21 % (Таблица 2).

Среди аминокислот сока, по сравнению с выжимкой, преобладали: аспарагиновая кислота (в 3,04 раза), гистидин (на 34,40 %), цистеин (на 31,97 %), тирозин (на 30,50 %), глутаминовая кислота (на 20,83 %), изолейцин (на 11,53 %), валин (на 10,94 %); тогда как в выжимке сконцентрировалось больше лизина (на 33,60 %), аргинина (на 27,25 %) и пролина (на 10,90 %).

Содержание незаменимых аминокислот в исследуемых образцах оказалось выше в 16,33–16,60 раза по сравнению с порошком ростков пшеницы, изученном в работе [9]. Такая разница объясняется сортовыми различиями исходного сырья, а также методикой получения сухого порошка ростков. Авторы производили срез ростков при достижении их высоты 6–8 дюймов (15–20 см) вместо оптимальных 10–14 см и высушивали микроволновым излучением мощностью 600 Вт в течение 15 минут. Это могло привести к термической денатурации белков со снижением детектируемости аминокислот методом высокоэффективной жидкостной хроматографии. В другой работе исследователи срезали ростки четырех сортов пшеницы на десятый день, отжимали сок и лиофилизировали его, что соответствует пробоподготовке настоящей работы [13]. Содержание общих аминокислот в порошке сока ростков пшеницы при условии ее проращивания в воде (гидропонный метод) варьировалось в зависимости от сортовых особенностей от 197,41 до 392,82 мг/г, из которых на незаменимые аминокислоты приходилось 92,44–156,51 мг/г. Это соответствует количеству общих (257,75–316,92 мг/г) и незаменимых (119,55–121,73 мг/г) аминокислот в полученных нами сублимированных образцах сока и выжимки.

Значения аминокислотного скора, представленные в Таблице 3, у всех незаменимых аминокислот сока и выжимки были выше 100 %, что свидетельствует о высоком качестве белков образцов и сопоставимо с аминокислотным скором белковых изолятов зернобобовых культур [46,47]. Значения минимального и максимального скора были выше у образца выжимки (115 % у гистидина, 250 % у лизина) по сравнению с аналогичными показателями в соке (109 % у лейцина, 190 % у валина). Для сравнения, скор лимитирующих аминокислот в соке из ростков белой пшеницы индийских сортов составляет 86 %, из цветных линий пшеницы — 113 % [31].

[10] Губаненко, Г. А., Наймушина, Л. В., Зыкова, И. Д., Речкина, Е. А. (2018). Аспекты применения порошка из выжимок проростков пшеницы для функциональных продуктов. *Инновации в пищевой биотехнологии: Сборник трудов Международного симпозиума*, Кемерово, 14–16 мая 2018 года, под общей редакцией А. Ю. Просекова. Кемерово: Кемеровский государственный университет, С. 426–431.

Таблица 2. **Аминокислотный состав образцов**
Table 2. **Amino acid composition of the samples**

Наименование аминокислоты	Образец			
	Сок		Выжимка	
	мг/г продукта	% от суммы	мг/г продукта	% от суммы
Аспарагиновая кислота	81,50 ± 0,15^a	25,71 ± 0,04^a	26,83 ± 0,03^b	10,40 ± 0,02^b
Треонин	13,12 ± 0,05^a	4,14 ± 0,02^a	11,80 ± 0,03^b	4,58 ± 0,01^b
Серин	13,11 ± 0,03^a	4,14 ± 0,01^a	11,70 ± 0,04^b	4,54 ± 0,02^b
Глутаминовая кислота	33,68 ± 0,06^a	10,62 ± 0,03^a	26,67 ± 0,04^b	10,34 ± 0,01^b
Пролин	10,26 ± 0,04^a	3,24 ± 0,01^a	11,52 ± 0,02^b	4,47 ± 0,01^b
Глицин	14,30 ± 0,03^a	4,51 ± 0,01^a	13,37 ± 0,03^b	5,19 ± 0,01^b
Аланин	18,81 ± 0,05^a	5,94 ± 0,02^a	17,01 ± 0,03^b	6,60 ± 0,01^b
Метионин	5,15 ± 0,05^a	1,63 ± 0,02^a	5,69 ± 0,02^b	2,21 ± 0,01^b
Цистеин	4,73 ± 0,06^a	1,49 ± 0,02^a	3,21 ± 0,01^b	1,25 ± 0,01^b
Валин	24,08 ± 0,12^a	7,59 ± 0,03^a	21,45 ± 0,06^b	8,32 ± 0,02^b
Изолейцин	13,17 ± 0,05^a	4,16 ± 0,02^a	11,65 ± 0,08^b	4,52 ± 0,03^b
Лейцин	21,13 ± 0,25^a	6,67 ± 0,08^a	20,71 ± 0,10^b	8,04 ± 0,04^b
Фенилаланин	14,23 ± 0,07^a	4,49 ± 0,02^a	13,60 ± 0,03^b	5,28 ± 0,01^b
Тирозин	4,59 ± 0,04^a	1,45 ± 0,01^a	3,19 ± 0,07^b	1,24 ± 0,03^b
Лизин	21,20 ± 0,21^a	6,69 ± 0,07^a	31,93 ± 0,14^b	12,38 ± 0,05^b
Гистидин	7,47 ± 0,07^a	2,36 ± 0,02^a	4,90 ± 0,05^b	1,90 ± 0,02^b
Аргинин	16,39 ± 0,02^a	5,17 ± 0,01^a	22,52 ± 0,04^b	8,74 ± 0,02^b
Триптофан	Не определялся		Не определялся	
Сумма	316,92 ± 0,74^a	100	257,75 ± 0,62^b	100
Незаменимые аминокислоты	119,55 ± 0,45^a	37,72 ± 0,14^a	121,73 ± 0,41^b	47,23 ± 0,16^b

Примечание: числовые данные представляют собой средние значения ± стандартное отклонение для группы $n = 3$; разными буквами обозначены статистически различающиеся значения между образцами ($p \leqslant 0,05$).

Таблица 3. **Аминокислотный скор, перевариваемость и биологическая ценность белков образцов**
Table 3. **Amino acid score, digestibility and biological value of proteins of the samples**

Наименование показателя	Образец	
	Сок	Выжимка
Аминокислотный скор незаменимых аминокислот, % от значений эталонного белка ФАО/ВОЗ		
Треонин	166 ± 1^a	178 ± 1^b
Метионин+ Цистеин	135 ± 1^a	146 ± 1^b
Валин	190 ± 1^a	202 ± 1^b
Изолейцин	139 ± 1^a	146 ± 1^b
Лейцин	109 ± 1^a	128 ± 1^b
Фенилаланин+Тирозин	145 ± 1^a	154 ± 1^b
Лизин	139 ± 1^a	250 ± 1^b
Гистидин	147 ± 1^a	115 ± 1^b
Триптофан	Не определялся	Не определялся
Перевариваемость белка *in vitro*, %	70,62 ± 0,13^a	47,05 ± 0,14^b
PDCAAS, ед.	0,77 ± 0,01^a	0,54 ± 0,01^b

Примечание: числовые данные представляют собой средние значения ± стандартное отклонение для группы $n = 3$; разными буквами обозначены статистически различающиеся значения между образцами ($p \leqslant 0,05$).

Белки сока ростков пшеницы по сравнению с аналогичными нутриентами выжимки переваривались на 33,38 % эффективнее в модели *in vitro*. За счет более высокой перевариваемости показатель биологической ценности белков сока, рассчитанный с учетом аминокислотного скора первой лимитирующей аминокислоты и степени усвояемости белков (PDCAAS), был на 70 % выше, чем у белков выжимки (0,77 и 0,54 ед. соответственно). Показатель PDCAAS белков сублимированного сока из ростков пшеницы был сопоставим с PDCAAS белка черной фасоли (0,75 ед.), тогда как у выжимки он соответствовал уровню арахисового белка (0,52 ед.) [48]. Следует отметить, что у нативного белка непроросшего зерна пшеницы данный показатель составляет 0,25 ед., что говорит об увеличенной биологической ценности белков сока и выжимки в 2,16–3,08 раза [48].

3.4. Углеводный состав образцов

Анализ углеводного состава сублимированных образцов сока и выжимки выявил преобладающее количество глюкозы среди других компонентов (Таблица 4), чем объясняется сладкий вкус продуктов. Это соответствует данным из работ по изучению углеводного состава невысушенного сока из ростков пшеницы и пророщенного зерна. Например, сок из ростков пшеницы содержал 17,48 мг/мл глюкозы, 12,10 мг/мл фруктозы с полным отсутствием сахарозы [22]. Другими исследователями в 100 г пророщенного зерна пшеницы установлено содержание глюкозы (1,085 ± 0,125 г; 32,49 % от суммы сахаров), мальтозы (0,82 ± 0,19 г; 24,55 %), фруктозы (0,75 ± 0,07 г; 22,46 %), сахарозы (0,59 ± 0,09 г; 17,67 %) и лактозы (0,10 ± 0,01 г; 2,99 %) [49].

Таблица 4. **Углеводный состав образцов, % от суммы углеводов**
Table 4. **Carbohydrate composition of the samples, % of total carbohydrates**

Наименование компонента	Образец	
	Сок	Выжимка
Высокомолекулярные соединения	32,52 ± 0,50[a]	40,15 ± 0,74[b]
Мальтотриоза	2,28 ± 0,21[a]	1,31 ± 0,19[b]
Мальтоза	2,14 ± 0,16[a]	1,40 ± 0,28[b]
Сахароза	3,07 ± 0,09[a]	3,81 ± 0,14[b]
Глюкоза	52,95 ± 0,13[a]	43,53 ± 0,20[b]
Фруктоза	7,04 ± 0,25[a]	9,80 ± 0,18[b]

Примечание: числовые данные представляют собой средние значения ± стандартное отклонение для группы $n = 3$; разными буквами обозначены статистически различающиеся значения между образцами ($p \leqslant 0,05$).

По сравнению с образцом сока в углеводах выжимки установлено повышенное содержание фруктозы (на 39,21 %), сахарозы (на 24,10 %) и высокомолекулярных соединений (на 23,46 %), в том числе за счет присутствия пищевых волокон. В углеводах сока наблюдалось более высокое количество простых сахаров (моно-, ди- и трисахаридов) — на 12,75 %. В частности, углеводы сока содержали больше мальтозы (на 52,86 %), мальтотриозы (на 74,05 %) и глюкозы (на 21,64 %).

3.5. Жирнокислотный состав образцов

Липиды сублимированного сока из ростков пшеницы обладали повышенной биологической эффективностью, так как отличались от выжимки увеличенным содержанием линолевой кислоты (на 6,74 %), мононенасыщенных жирных кислот (на 34,56 %), а также сниженным количеством насыщенных жирных кислот (на 10,67 %) (Таблица 5). Среди мононенасыщенных жирных кислот в липидах сока отмечено более высокое содержание олеиновой кислоты — в 4,66 раза. При этом в выжимке обнаружена гадолеиновая кислота, которая в соке отсутствовала. Насыщенные жирные кислоты сока отличались наличием лауриновой кислоты, а также увеличенным содержанием миристиновой (на 71,43 %), стеариновой (на 53,71 %) и пальмитиновой (на 27,03 %) кислот. В липидах выжимки находилось больше бегеновой (в 4,61 раза), арахиновой (в 4,58 раза) и генэйкозановой (на 82,43 %) кислот.

Согласно данным [50], жирнокислотный состав масла зародышей пшеницы различных сортов представлен линолевой (47,9–56,2 %), пальмитиновой (14,9–23,9 %), олеиновой (16,5–27,7 %), линоленовой (2,54–6,60 %), стеариновой (0,77–1,38 %), пальмитолеиновой (0,08–0,68 %), бегеновой (0,18–0,44 %), арахиновой (0,08–0,17 %) и гадолеиновой (0,07–0,12 %) кислотами. Другие исследователи обнаружили в масле зародышей пшеницы содержание лауриновой (0,31 %), миристиновой (0,21 %), гептадеценовой (0,07 %) и маргариновой (0,05 %) жирных кислот [7]. Однако основную часть липидов представляли все те же жирные кислоты: линолевая (53,97 %), олеиновая (19,01 %), пальмитиновая (18,06 %) и линоленовая (4,97 %). Это позволяет предположить, что в процессе проращивания зерна перераспределяется часть жирных кислот, а именно, происходит частичное разрушение полиненасыщенных (линолевой, линоленовой) и мононенасыщенных (олеиновой, пальмитолеиновой) жирных кислот при концентрировании насыщенных кислот (пальмитиновой, стеариновой, арахиновой, бегеновой).

Таблица 5. **Жирнокислотный состав образцов, % от суммы липидов**
Table 5. **Fatty acid composition of the samples, % of total lipids**

Наименование компонента	Образец	
	Сок	Выжимка
Полиненасыщенные жирные кислоты		
Линолевая ($C_{18:2}$)	11,24 ± 0,05[a]	10,53 ± 0,07[b]
Мононенасыщенные жирные кислоты		
Олеиновая ($C_{18:1}$)	13,43 ± 0,04[a]	2,88 ± 0,01[b]
Гадолеиновая ($C_{20:1}$)	–	3,63 ± 0,02
Нервоновая ($C_{24:1}$)	10,67 ± 0,01[a]	11,40 ± 0,01[b]
Насыщенные жирные кислоты		
Лауриновая ($C_{12:0}$)	0,63 ± 0,01	–
Миристиновая ($C_{14:0}$)	3,00 ± 0,02[a]	1,75 ± 0,03[b]
Пальмитиновая ($C_{16:0}$)	47,47 ± 0,06[a]	37,37 ± 0,04[b]
Стеариновая ($C_{18:0}$)	5,38 ± 0,02[a]	3,50 ± 0,01[b]
Арахиновая ($C_{20:0}$)	1,92 ± 0,03[a]	8,79 ± 0,02[b]
Генэйкозановая ($C_{21:0}$)	3,13 ± 0,03[a]	5,71 ± 0,03[b]
Бегеновая ($C_{22:0}$)	3,13 ± 0,01[a]	14,44 ± 0,02[b]

Примечание: числовые данные представляют собой средние значения ± стандартное отклонение для группы $n = 3$; разными буквами обозначены статистически различающиеся значения между образцами ($p \leqslant 0,05$).

4. Выводы

Определен биохимический состав сублимированных образцов сока и выжимки ростков, выращенных гидропонным методом, из зерна пшеницы современного сорта «Юбилейная 60». Установлено значительное увеличение (в 2,16–3,08 раза) биологической ценности белков сока и выжимки ростков по сравнению с непроросшим зерном, а также продемонстрирован высокий аминокислотный скор продуктов (109–250 %). В процессе проращивания зерна происходило частичное разрушение полиненасыщенных и мононенасыщенных жирных кислот, что может негативно сказаться на скорости усвоения липидов сока и выжимки. Содержание глюкозы на уровне 43,53–52,95 % от общих углеводов обуславливает сладкий вкус полученных продуктов. В сублимированном соке было зафиксировано высокое содержание азотистых веществ небелковой природы (33,02 % в пересчете на СВ), тогда как в выжимке сконцентрировалось подавляющее количество высокомолекулярных углеводов (40,15 % от общего содержания), способных оказывать благоприятное воздействие на организм. Установленная высокая биологическая ценность свидетельствует о перспективности получения сублимированного сока и выжимки ростков пшеницы из зерна сорта «Юбилейная 60», а также о целесообразности их применения в качестве биологически активной добавки в спортивном питании, напитках и коктейлях, кондитерских, хлебобулочных, макаронных изделиях и других продуктах.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / REFERENCES

1. Куликов, Д. С., Королев, А. А. (2025). Аспекты ферментативной модификации растительных белков. *Пищевые системы*, 8(1), 22–28. [Kulikov, D. S., Korolev, A. A. (2025). Aspects of enzymatic modification of plant proteins. *Food Systems*, 8(1), 22–28. (In Russian)] https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-1-22-28
2. Губаненко, Г. А., Речкина, Е. А., Наймушина, Л. В., Маюрникова, Л. А., Мацкевич, И. В., Балябина, Т. А. (2019). Технология переработки ростков пшеницы с получением порошка из выжимок с высоким содержанием биологически активных веществ. *Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий*, 81(2), 154–161. [Gubanenko, G. A., Rechkina, E. A., Naymushina, L. V., Mayurnikova, L. A., Matskevich, I. V., Balyabina, T. A. (2019). Wheat sprouts processing technology and powder receiving from the marcs with high content of the biological active substances. *Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies*, 81(2), 154–161. (In Russian)] https://doi.org/10.20914/2310-1202-2019-2-154-161
3. Куликов, Д. С., Королев, А. А., Панкратов, И. В. (2025). Анализ современных способов получения гидролизатов и биоактивных пептидов из белковых компонентов пшеницы. *Пищевая промышленность*, 4, 88–94. [Kulikov, D. S., Korolev, A. A., Pankratov, I. V. (2025). Analysis of modern methods for obtaining hydrolysates and bioactive peptides from protein components of wheat. *Food Industry*, 4, 88–94. (In Russian)] https://doi.org/10.52653/PPI.2025.4.4.016
4. Куликов, Д. С., Королев, А. А., Панкратов, И. В. (2026). Применение гидролизатов и биоактивных пептидов из белковых компонентов пшеницы в различных отраслях пищевой промышленности (мини-обзор). *Пищевая промышленность*, 3, 99–103. [Kulikov, D. S., Korolev, A. A., Pankratov, I. V. (2026). Application of hydrolysates and bioactive peptides from wheat protein components in various sectors of the food industry (Mini-review). *Food Industry*, 3, 99–103. (In Russian)] https://doi.org/10.52653/PPI.2026.3.3.019
5. Куликов, Д. С., Королев, А. А., Панкратов, И. В. (2025). Биологические свойства гидролизатов и пептидов из белковых компонентов пшеницы.

Пищевая промышленность, 11, 71–77. [Kulikov, D. S., Korolev, A. A., Pankratov, I. V. (2025). Biological properties of hydrolysates and peptides from wheat protein components. *Food Industry,* 11, 71–77. (In Russian)] https://doi.org/10.52653/PPI.2025.11.11.012
6. Youssef, H. M. K. E. (2015). Assessment of gross chemical composition, mineral composition, vitamin composition and amino acids composition of wheat biscuits and wheat germ fortified biscuits. *Food and Nutrition Sciences*, 6(10), 845–853. https://doi.org/10.4236/fns.2015.610088
7. Dyab, A. S., Atieya, K. M., Abdel Salam, M. A. (2024). Improvement and quality evaluation of rutab date paste fortified with wheat germ. *Food Systems*, 7(4), 620–626. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2024-7-4-620-626
8. Rodríguez-Fernández, M., Revilla, I., Rodrigo, P., López-Calabozo, R., Vivar-Quintana, A.M. (2025). Wheat germ as partial or total substitutive of lean meat in low-fat cooked sausages. *Foods*, 14(2), Article 178. https://doi.org/10.3390/foods14020178
9. Thakur, N., Singh, A. (2022). Amino acid and vitamin content of wheatgrass (*Triticum aestivum*) powder. *International Journal of Food and Nutritional Sciences*, 11(7), 976–980.
10. Несчисляев, В. А., Хохрякова, М. Д., Бронников, Т. Б. (2021). Исследование бактериотропных свойств сока из зеленых ростков пшеницы. *Медико-фармацевтический журнал Пульс*, 23(8), 144–149. [Neschiclyaev, V. A, Hohryakova, M. D., Bronnikov, T. B. (2021). Investigation of bacteriotropic properties of juice from green wheat sprouts. *Medical and Pharmaceutical Journal "Pulse"*, 23(8), 144–149. (In Russian)] https://doi.org/10.26787/nydha-2686-6838-2021-23-8-144-149
11. Зенькова, М. Л. (2019). Исследование минерального и аминокислотного состава пророщенного и консервированного зерна пшеницы. *Техника и технология пищевых производств*, 49(4), 513–521. [Zenkova, M. L. (2019). Mineral and amino acid composition of germinated and canned wheat grains. *Food Processing: Techniques and Technology*, 49(4), 513–521. (In Russian)] https://doi.org/10.21603/2074-9414-2019-4-513-521
12. Казина, В. В., Сафронова, Т. Н., Ермош, Л. Г. (2018). Разработка технологии получения сока из ростков пшеницы с определением режимов и сроков его хранения. *Техника и технология пищевых производств*, 48(2), 64–72. [Kazina, V. V., Safronova, T. N., Ermosh, L. G. (2018). Wheat sprouts juice production technology development and determination of juice storage modes and terms. *Food Processing: Techniques and Technology,* 48(2), 64–72. (In Russian)] https://doi.org/10.21603/2074-9414-2018-2-64-72
13. Kaur, N., Singh, B., Kaur, A., Yadav, M. P., Singh, N., Ahlawat, A. K. et al. (2021). Effect of growing conditions on proximate, mineral, amino acid, phenolic composition and antioxidant properties of wheatgrass from different wheat (*Triticum aestivum L.*) varieties. *Food Chemistry*, 341(Part 1), Article 128201. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128201
14. Олесова, Л. Д. (2021). Перспективность биогенного продукта из ростков пшеницы в профилактике и лечении заболеваний на Севере. *Медицина. Социология. Философия. Прикладные исследования*, 2, 20–24. [Olesova, L. D. (2021). Perspectivity of a biogenic product — juice from wheat sprouts in prevention and treatment of diseases in the North. *Medicine. Sociology. Philosophy. Applied Research*, 2, 20–24. (In Russian)]
15. Virdi, A. S., Singh, N., Bains, K. K., Kaur, A. (2021). Effect of photoperiod and growth media on yield and antioxidant properties of wheatgrass juice of Indian wheat varieties. *Journal of Food Science and Technology-Mysore*, 58(8), 3019–3029. https://doi.org/10.1007/s13197-020-04805-8
16. Mer, A., Vyas, K., Patani, P. (2024). Wheatgrass: A comprehensive review on its therapeutic potential. *Journal of Population Therapeutics and Clinical Pharmacology*, 31(11), 1252–1260. https://doi.org/10.53555/1rmwrf75
17. Тарасов, С. С., Крутова, Е. К., Михалев, Е. В. (2025). Формирование редоксома в листьях проростков пшеницы под действием экстракта вешенки. *Химия растительного сырья*, 4, 335–347. [Tarasov, S. S., Krutova, E. K., Mikhalev, E. V. (2025). Redoxome formation in leaves of wheat seedlings under the influence of oyster mushroom extract. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*, 4, 335–347. (In Russian)] https://doi.org/10.14258/jcprm.20250413912
18. Hebbani, A. V., Bulle, S., Kanu, V. R., Malini, A. B., Reddy, V. D., Chakravarthula, V. N. (2020). Nephro-protective activity of wheatgrass juice against alcohol-induced oxidative damage in rats. *Toxicology Mechanisms and Methods*, 30(9), 679–686. https://doi.org/10.1080/15376516.2020.1810837
19. Солодников, С. Ю., Люшина, Г. А., Колесова, О. В., Маслова, В. В., Андреева, Ю. В., Кузнецов, А. А. (2015). Оценка биологических свойств сока из ростков пшеницы. Разработка технологии его получения. *Техника и технология пищевых производств*, 3(38), 62–68. [Solodnikov, S. Yu., Lyushina, G. A., Kolesova, O. V., Maslova, V. V., Andreeva, Yu. V., Kuznetsov, A. A. (2015). Assessment of biological properties of wheat grass juice. Technology development for its production. *Food Processing: Techniques and Technology*, 3(38), 62–68. (In Russian)]
20. Deepak, B., Farha R. S., Prajna P. S., Rashmitha, A., Yuvaraj, P., Shrikanth, M. (2025). Therapeutic potential of wheatgrass juice: A comprehensive narrative review. *Journal of Pharmacy and BioAllied Sciences*, 17(Suppl 1), S152–S154. https://doi.org/10.4103/jpbs.jpbs_179_25
21. Minocha, N., Saini, S., Pandey, P. (2022). Nutritional prospects of wheatgrass (*Triticum aestivum*) and its effects in treatment and chemoprevention. *Exploration of Medicine*, 3, 432–442. https://doi.org/10.37349/emed.2022.00104
22. Eissa, H. A., Mohamed, S. S., Hussein, A. M. S. (2020). Nutritional value and impact of wheatgrass juice (Green Blood Therapy) on increasing fertility in male albino rats. *Bulletin of the National Research Centre*, 44, Article 30. https://doi.org/10.1186/s42269-020-0272-x
23. Abu-Elfotuh, K., Ragab, G. M., Salahuddin, A., Jamil, L., Abd Al Haleem, E. N. (2021). Attenuative effects of fluoxetine and *Triticum aestivum* against aluminum-induced Alzheimer's disease in rats: The possible consequences on hepatotoxicity and nephrotoxicity. *Molecules,* 26(21), Article 6752. https://doi.org/10.3390/molecules26216752
24. Олесова, Л. Д., Борисова, Н. Т., Охлопкова, Е. Д., Ефремова, С. Д. (2025). Оценка влияния некоторых биологических свойств сока из ростков якутских сортов пшеницы на организм женщин. *Якутский медицинский журнал*, 3, 43–47. [Olesova, L. D., Borisova, N. T., Okhlopkova, E. D., Efremova, S. D. (2025). Evaluation of the effect of some biological properties of sprout juice of Yakut wheat varieties on women's bodies. *Yakut Medical Journal*, 3, 43–47. (In Russian)] https://doi.org/10.25789/YMJ.2025.91.10
25. Deepak, Lakshmeesha, D. R. (2022). Study to assess the efficacy of wheatgrass juice therapy intervention on hemoglobin level in adolescent anemic females. *Indo Global Journal of Pharmaceutical Sciences*, 12, 30–35. https://doi.org/10.35652/IGJPS.2022.12003
26. Takács, I., Urkon, M., Kiss, T., Horváth, E., Laczkó-Zöld, E., Zomborszki, Z. P. et al. (2021). The effect of wheatgrass lyophilizate on blood clotting time in rats. *Scientia Pharmaceutica*, 89(3), Article 39. https://doi.org/10.3390/scipharm89030039
27. Ali, N., Popović, V., Koutchma, T., Warriner, K., Zhu, Y. (2020). Effect of thermal, high hydrostatic pressure, and ultraviolet-C processing on the microbial inactivation, vitamins, chlorophyll, antioxidants, enzyme activity, and color of wheatgrass juice. *Journal of Food Process Engineering*, 43(1), Article e13036. https://doi.org/10.1111/JFPE.13036
28. Devi, C.B., Bains, K., Kaur, H. (2019). Effect of drying procedures on nutritional composition, bioactive compounds and antioxidant activity of wheatgrass (*Triticum aestivum L*). *Journal of Food Science and Technology*, 56(1), 491–496. https://doi.org/10.1007/s13197-018-3473-7
29. Tullo, A. (2021). Minerals and vitamins analysis of two bread wheat varieties for wheatgrass juice content. *International Journal of Food Science and Biotechnology*, 6(3), 73–78. https://doi.org/10.11648/j.ijfsb.20210603.12
30. Petrović, S., Vila, S., Šestanj, S. G., Rebekić, A. (2024). Variation in nutritional value of diverse wheat genotypes. *Agronomy*, 14(2), Article 311. https://doi.org/10.3390/agronomy14020311
31. Sharma, A., Yadav, M., Sharma, N., Kumari, A., Kaur, S., Meenu, M. et al. (2022). Comparison of wheatgrass juices from colored wheat (white, black, blue, and purple) for health promoting phytochemicals. *Food Research International*, 161, Article 111833. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.111833
32. Sharma, N., Tiwari, V., Vats, S., Kumari, A., Chunduri, V., Kaur, S. et al. (2020). Evaluation of anthocyanin content, antioxidant potential and antimicrobial activity of black, purple and blue colored wheat flour and wheat-grass juice against common human pathogens. *Molecules*, 25(24), Article 5785. https://doi.org/10.3390/molecules25245785
33. Захаренко, В. А., Давыдова, Н. В. (2020). Фитосанитарный потенциал высокопродуктивных сортов яровой пшеницы селекции ФИЦ «Немчиновка». *Защита и карантин растений*, 5, 13–15. [Zakharenko, V. A., Davydova, N. V. (2020). Phytosanitary potential of highly productive spring wheat varieties of the Federal Research Center «Nemchinovka» selection. *Plant Protection and Quarantine*, 5, 13–15. (In Russian)]
34. Ториков, В. Е., Мельникова, О. В., Никифоров, В. М., Резунов А. А. (2025). Урожайность и качество зерна современных сортов яровой пшеницы в условиях центрального Нечерноземья. *Вестник Брянской ГСХА*, 1(107), 11–19. [Torikov, V. Ye., Mel'nikova, O. V., Nikiforov, V. M., Rezunov, A. A. (2025). Yields and grain quality of modern spring wheat varieties in the conditions of the central Non-Black Soil Zone. *Vestnik of the Bryansk State Agricultural Academy,* 1(107), 11–19. (In Russian)]
35. Шишкин, А. С., Амелин, А. В. (2024). Влияние приемов химизации на урожайность и качество зерна у современных сортов яровой пшеницы в условиях Центрально-Черноземного региона России. *Вестник аграрной науки*, 5(110), 51–61. [Shishkin, A. S., Amelin, A. V. (2024). The influence of chemicalization techniques on grain yield and quality in modern varieties of spring wheat in the conditions of the central Black Earth Region of Russia. *Bulletin of Agrarian Science,* 5(110), 51–61. (In Russian)] https://doi.org/10.17238/issn2587-666X.2024.5.51
36. Василевская, Е. Р., Арюзина, М. А., Ахремко, А. Г. (2022). Биоконверсия *in vitro*: сравнение мультиферментных систем INFOGEST 2.0 и протокола Покровского-Ертанова. *Все о мясе,* 6, 44–49. [Vasilevskaya, E. R., Aruzina, M. A., Akhremko, A. G. (2022). *In vitro* bioconversion: Comparison of multienzyme systems INFOGEST 2.0 and Pokrovkiy-Ertanov protocol. *Vsyo o Myase,* 6, 44–49. (In Russian)] https://doi.org/10.21323/2071-2499-2022-6-44-49
37. Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2013). Dietary protein quality evaluation in human nutrition: Report of an FAO Expert Consultation. Retrieved from: https://www.fao.org/4/i3124e/i3124e.pdf Accessed December 15, 2025.
38. Rexhepi, A. H., Kongoli, R. (2015). Sensory analysis for consumer acceptance and juice extraction yield of wheatgrass, barley grass and oat grass juices. *International Journal of Innovative Research in Science and Engineering,* 3(12), 407–413.
39. Qamar, A., Saeed, F., Nadeem, M. T., Hussain, A. I., Khan, M. A., Niaz, B. (2019). Probing the storage stability and sensorial characteristics of wheat and barley grasses juice. *Food Science and Nutrition,* 7(2), 554–562. https://doi.org/10.1002/fsn3.841
40. Bawa, K., Brar, J. K., Singh, A., Gupta, A., Kaur, H., Bains, K. (2022). Wheatgrass powder-enriched functional pasta: Techno-functional, phytochemical, textural, sensory, and structural characterization. *Journal of Texture Studies*, 53(4), 517–530. https://doi.org/10.1111/jtxs.12680
41. Devi, C. B., Chatli, M. K., Bains, K., Kaur, H., Rindhe, S. N. (2019). Enrichment of wheatgrass (*Triticum aestivum L*) juice and powder in milk and meat-based food products for enhanced antioxidant potential. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 8(6), 3259–3268. https://doi.org/10.20546/ijcmas.2019.806.388
42. Thakur, N., Dhaliwal, H. S., Sharma, V. (2019). Chemical composition, minerals and vitamins analysis of lyophilized wheatgrass juice powder. *International Journal on Emerging Technologies*, 10(4), 137–144.
43. de Wit, N., Esser, D., Siebelink, E., Fischer, A., Sieg, J., Mes, J. (2019). Extrinsic wheat fibre consumption enhances faecal bulk and stool frequency; A randomized controlled trial. *Food and Function*, 10(2), 646–651. https://doi.org/10.1039/c8fo01649f
44. Ростовская, М. Ф., Извекова, А. Н., Алябьев, Б. А., Приходько, Ю. В. (2014). Динамика азотистых веществ в процессе солодоращения зерна пшеницы с различным содержанием белка. *Химия растительного сырья*, 2,

261–266. [Rostovskaya, M. F., Izvekova, N. N., Alyabyev, B. A, Prikhodko, Y. V. (2014). Dynamics of nitrogen compounds during malting process of wheat with different protein levels in grain. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*, 2, 261–266. (In Russian)] https://doi.org/10.14258/jcprm.1402261
45. Wang, Y., Wang, D., Tao, Z., Yang, Y., Gao, Z., Zhao, G., et al. (2021). Impacts of nitrogen deficiency on wheat (*Triticum aestivum L.*) grain during the medium filling stage: Transcriptomic and metabolomic comparisons. *Frontiers in Plant Science*, 12, Article 674433. https://doi.org/10.3389/fpls.2021.674433
46. Дегтярев, И. А., Гаравири, М., Фоменко, И. А., Вострикова, Н. Л., Машенцева, Н. Г. (2025). Сравнение функционально-технологических свойств и аминокислотного состава изолятов белка растительного происхождения. *Вестник КрасГАУ,* 2(215), 202–215. [Degtyarev, I. A., Garaviri, M., Fomenko, I. A., Vostrikova, N. L., Mashentseva, N. G. (2025). Comparison of functional and technological properties and amino acid composition of protein isolates of plant origin. *Bulliten KrasSAU,* 2(215), 202–215. (In Russian)] https://doi.org/10.36718/1819-4036-2025-2-202-215
47. Колпакова, В. В., Уланова, Р. В., Куликов, Д. С., Гулакова, В. А., Семенов, Г. В., Шевякова, Л. В. (2022). Показатели качества гороховых и нутовых белковых концентратов. *Техника и технология пищевых производств*, 52(4), 649–664. [Kolpakova, V. V., Ulanova, R. V., Kulikov, D. S., Gulakova, V. A., Semenov, G. V., Shevjakova, L. V. (2022). Pea and chickpea protein concentrates: Quality indicators. *Food Processing: Techniques and Technology*, 52(4), 649–664. (In Russian)] https://doi.org/10.21603/2074-9414-2022-4-2394
48. Hoffman, J. R., Falvo, M. J. (2004). Protein — Which is Best? *Journal of Sports Science and Medicine*, 3(3), 118–130.
49. Зенькова, М. Л., Акулич, А. В., Мельникова, Л. А., Тимофеева, В. Н. (2020). Исследование нутриентного профиля пророщенного зерна мягкой пшеницы, выращенной в Беларуси. *Хранение и переработка сельхозсырья*, 3, 58–68. [Zenkova, M. L., Akulich, A. V., Melnikova, L. A., Timofeeva, V. N. (2020). Nutrient profile research of sprouted soft wheat grain grown in Belarus. *Storage and Processing of Farm Products*, 3, 58–68. (In Russian)] https://doi.org/10.36107/spfp.2020.339
50. Relina, L. I., Suprun, O. H., Boguslavskyi, R. L., Didenko, S. Yu., Vecherska, L. A., Golik, O. V. (2020). Fatty acid composition of oil from grain of some tetraploid wheat species. *Biotechnologia Acta*, 13(2), 56–64. https://doi.org/10.15407/biotech13.02.056

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ	AUTHOR INFORMATION
Принадлежность к организации	**Affiliation**
Панкратов Игорь Владимирович — аспирант, младший научный сотрудник, лаборатория процессов и оборудования консервного производства, Всероссийский научно-исследовательский институт технологии консервирования 142703, Московская область, Видное, ул. Школьная, 78 E-mail: i.pankratov@fncps.ru ORCID: http://orcid.org/0009-0006-1891-3424	**Igor V. Pankratov**, Graduate Student, Junior Researcher, Laboratory of Processes and Equipment for Canning Production, Russian Research Institute of Canning Technology 78, Shkol`naya str., 142703, Vidnoe, Moscow region, Russia E-mail: i.pankratov@fncps.ru ORCID: http://orcid.org/0009-0006-1891-3424
Куликов Денис Сергеевич — кандидат технических наук, старший научный сотрудник, лаборатория процессов и оборудования консервного производства, Всероссийский научно-исследовательский институт технологии консервирования 142703, Московская область, Видное, ул. Школьная, 78 E-mail: d.kulikov@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2171-0522 * автор для контактов	**Denis S. Kulikov**, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Laboratory of Processes and Equipment for Canning Production, Russian Research Institute of Canning Technology 78, Shkol`naya str., 142703, Vidnoe, Moscow region, Russia E-mail: d.kulikov@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2171-0522 * corresponding author
Королев Алексей Александрович — кандидат технических наук, заведующий лабораторией процессов и оборудования консервного производства, Всероссийский научно-исследовательский институт технологии консервирования 142703, Московская область, Видное, ул. Школьная, 78 E-mail: a.korolev@fncps.ru ORCID: http://orcid.org/0000-0002-7144-2522	**Alexey A. Korolev**, Candidate of Technical Sciences, Head of the Laboratory of Processes and Equipment for Canning Production, Russian Research Institute of Canning Technology 78, Shkol`naya str., 142703, Vidnoe, Moscow region, Russia E-mail: a.korolev@fncps.ru ORCID: http://orcid.org/0000-0002-7144-2522
Калугина Зоя Ивановна — младший научный сотрудник, Научно-исследовательский испытательный центр, Всероссийский научно-исследовательский институт технологии консервирования 142703, Московская обл., Видное, ул. Школьная, 78 E-mail: z.kalugina@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0009-0007-9254-6009	**Zoya I. Kalugina**, Junior Researcher, Research and Testing Center, Russian Research Institute of Canning Technology 78, Shkol'naya str., Vidnoe, 142703, Moscow region, Russia E-mail: z.kalugina@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0009-0007-9254-6009
Буданов Андрей Вадимович — младший научный сотрудник, Научно-исследовательский испытательный центр, Всероссийский научно-исследовательский институт технологии консервирования 142703, Московская обл., Видное, ул. Школьная, 78 E-mail: a.budanov@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0009-0001-3019-0648	**Andrey V. Budanov**, Junior Researcher, Research and Testing Center, Russian Research Institute of Canning Technology 78, Shkol'naya str., Vidnoe, 142703, Moscow region, Russia E-mail: a.budanov@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0009-0001-3019-0648
Критерии авторства	**Contribution**
Авторы в равных долях имеют отношение к написанию рукописи и одинаково несут ответственность за плагиат.	Authors equally relevant to the writing of the manuscript, and equally responsible for plagiarism.
Конфликт интересов	**Conflict of interest**
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.	The authors declare that there is no conflict of interest.

DOI: https://doi.org/10.21323/2618-9771-2026-9-2-216-227

Поступила 26.01.2026
Поступила после рецензирования 08.05.2026
Принята в печать 14.05.2026
© Топникова Е. В., Пчелкина В. А., Данилова Е. С., Пирогова Е. Н., Заболотин Г. Ю., 2026

https://www.fsjour.com/jour
Научная статья
Открытый доступ

ВЫЯВЛЕНИЕ ФАЛЬСИФИКАЦИИ МОЛОЧНЫХ ПРОДУКТОВ ГОВЯЖЬИМ ЖИРОМ ПРИ КОМПЛЕКСНОЙ ОЦЕНКЕ ЖИРОВОЙ ФАЗЫ

Топникова Е. В.[1], Пчелкина В. А.[2], Данилова Е. С.[1], Пирогова Е. Н.[1], Заболотин Г. Ю.[2]

[1] Всероссийский научно-исследовательский институт маслоделия и сыроделия, Углич, Ярославская область, Россия
[2] Федеральный научный центр пищевых систем им. В. М. Горбатова, Москва, Россия

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:
молочный жир, говяжий жир, идентификация, физико-химические показатели, жирнокислотный состав, рамановская спектроскопия

АННОТАЦИЯ

В статье рассматривается влияние добавленного говяжьего жира на изменение показателей качества жировой фазы молочных продуктов и оценивается возможность их комплексного применения для целей идентификации. Исследовали физико-химические свойства жировой фазы: состав жирных кислот и их соотношение, температуру плавления, йодное число и число Рейхерта–Мейссля, кислотность и органолептические показатели. Дополнительно выполняли спектральный анализ с использованием рамановской спектроскопии. Были проведены сравнительные испытания молочного и говяжьих жиров, модельных смесей жировой фазы фальсифицированного продукта с долей говяжьего жира в жировой фазе от 5 до 30 %. Результаты показали достоверное различие молочного и говяжьего жира по всем исследованным показателям. В модельных смесях заданного диапазона достоверные различия с контролем выявлены по органолептическим показателям (при добавлении говяжьего жира 10 % и более), числу Рейхерта–Мейссля (при 15 % и более) и соотношению $C_{18:0}/C_{14:0}$ (при 5 % и более). Йодное число, температура плавления и кислотность жировой фазы не показали значимого отличия фальсифицированной жировой фазы от молочного жира. Основные полосы рамановских спектров исследованных образов приписаны колебаниями насыщенных и ненасыщенных структур жирных кислот в областях 1265 $см^{-1}$, 1300 $см^{-1}$, 1440 $см^{-1}$, 1650 $см^{-1}$ и 1747 $см^{-1}$. Спектральный анализ показал значимые различия молочного жира и говяжьих жиров в части интенсивности сигналов спектров. В образце говяжьего жира с эмульгаторами и ароматизатором выявлено отчетливое раздвоение сигнала в области 1720–1760 $см^{-1}$, а также появление на спектре полосы 1175 $см^{-1}$, характеризующее колебания карбонильно-сложноэфирной группы глицеринового остова в молекулах глицеридов. В модельных образцах жировой фазы фальсифицированного продукта различия по результатам рамановской спектроскопии выявлены при добавлении более 15 % говяжьего жира, что может являться дополнительным критерием оценки жировой фазы продукта после проведения дальнейших системных исследований по данному вопросу.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Статья подготовлена в рамках выполнения Государственного задания № FGUS-2024-0008 ФГБНУ «Федеральный научный центр пищевых систем им. В. М. Горбатова» РАН.

Received 26.01.2026
Accepted in revised 08.05.2026
Accepted for publication 14.05.2026
© Topnikova E. V., Pchelkina V. A., Danilova, E. S., Pirogova, E. N., Zabolotin G. Yu., 2026

Available online at https://www.fsjour.com/jour
Original scientific article
Open access

DETECTION OF ADULTERATION OF DAIRY PRODUCTS WITH BEEF FAT BY COMPREHENSIVE ASSESSMENT OF THE FAT PHASE

Elena V. Topnikova[1], Viktoriya A. Pchelkina[2], Ekaterina S. Danilova[1,*], Ekaterina N. Pirogova[1], Grigoriy Yu. Zabolotin[1]

[1] All-Russian Scientific Research Institute of Butter- and Cheesemaking, Uglich, Yaroslavl Region, Russia
[2] V. M. Gorbatov Federal Research Center of Food Systems, Moscow, Russia

KEYWORDS:
milk fat, beef fat, identification, physico-chemical indicators, fatty acid composition, Raman spectroscopy

ABSTRACT

An effect of added beef fat on changes in quality indicators of the fat phase of dairy products has been examined and the possibility of their complex use for the identification purpose has been assessed. Physico-chemical parameters of the fat phase were assessed: the composition of fatty acids and their ratio, melting temperature, iodine value and the Reichert-Meissl number, acidity and organoleptic properties. In addition, the spectral analysis was carried out with the use of Raman spectroscopy. Comparative examinations of milk and beef fats, model mixtures of the fat phase of the falsified product with a proportion of beef fat in the fat phase from 5 to 30 % were carried out. The results showed significant differences between milk and beef fat by all studied indicators. In the model mixtures of the given range, significant differences with the control were revealed for organoleptic parameters (upon addition of beef fat at a level of 10 % and higher), the Reichert-Meissl number (at 15 % and higher) and a $C_{18:0}/C_{14:0}$ ratio (at 5 % and higher). The iodine value, melting temperature, and acidity of the fat phase did not show a significant difference of the falsified fat phase from milk fat. The main bands of Raman spectra of the studied samples were ascribed to vibrations of saturated and unsaturated structures of fatty acids in the regions of 1265 cm^{-1}, 1300 cm^{-1}, 1440 cm^{-1}, 1650 cm^{-1} and 1747 cm^{-1}. The spectral analysis showed significant differences between milk fat and beef fats in terms of the intensity of the spectrum signals. In the sample of beef fat with emulsifiers and flavoring agents, a clear bifurcation of the signal in the region of 1720–1760 cm^{-1} was observed, as well as the appearance of a band at 1175 cm^{-1} in the spectrum characterizing vibrations of ester carbonyl group of the glycerol backbone in the molecules of glycerides. In the model samples of the fat phase of the falsified product, differences in the results of the Raman spectroscopy were revealed upon adding more than 15 % of beef fat, which can be an additional criterion of the assessment of the fatty phase of a product after conducting further systemic investigations on this issue.

FUNDING: The article was prepared within the framework of the State Assignment No. FGUS-2024-0008 of the Federal State Budgetary Scientific Institution “V. M. Gorbatov Federal Research Center for Food Systems” of the Russian Academy of Sciences.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: **Топникова, Е. В., Пчелкина, В. А., Данилова, Е. С., Пирогова, Е. Н., Заболотин, Г. Ю.** (2026). Выявление фальсификации молочных продуктов говяжьим жиром при комплексной оценке жировой фазы. *Пищевые системы*, 9(2), 216–227. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2026-9-2-216-227

FOR CITATION: **Topnikova, E. V., Pchelkina, V. A, Danilova, E. S., Pirogova, E. N., Zabolotin, G. Yu.** Detection of adulteration of dairy products with beef fat by comprehensive assessment of the fat phase. *Food Systems,* 9(2), 216–227. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2026-9-2-216-227

1. Введение

При выпуске пищевой продукции в оборот наряду с обеспечением безопасности все большее значение приобретает ее качество и гарантия подлинности. Эти показатели отражают уровень производства и его способность удовлетворять запросы современного потребителя, готового приобретать продукцию по более высокой цене при уверенности в ее качестве и натуральности [1,2].

Качество пищевых продуктов определяется их соответствием совокупности характеристик, обеспечивающих приятные органолептические свойства и удовлетворение потребностей человека в основных пищевых веществах и энергии, включая макро- и микрокомпоненты [3].

Несмотря на общее улучшение состояния молочной отрасли, сохраняется проблема фальсификации продукции [4–6]. Наиболее фальсифицируемым продуктом остается сливочное масло; далее следуют сыры, сметана, творог [4,6,7]. Самым распространенным способом фальсификации считается замена молочного жира растительными [4,6] или животными жирами, в частности говяжьим жиром [8,9]. Поэтому актуальными являются вопросы выявления фальсификации молочной продукции жирами немолочного происхождения.

Особенности определения примеси растительных жиров в жировой фазе молочных продуктов методически достаточно хорошо проработаны и включены в действующие документы по стандартизации, устанавливающие алгоритм выявления подлинности жировой фазы молочных продуктов [10]. Кроме того, они закреплены в методах контроля для отдельных групп продукции, в частности сливочного масла и сыров различных видов. Этот алгоритм включает оценку жирнокислотного состава жировой фазы продукта (ЖКС) с последующим определением стеринового состава при обнаружении отклонений в ЖКС от нормируемых диапазонов. В случае обнаружения фитостеринов, являющихся характерными маркерами растительных жиров, эксперты делают вывод о фальсификации молочного продукта растительными жирами. Следует отметить, что выявление фитостеринов выше допустимого уровня может быть и результатом существенного изменения рационов кормления лактирующих животных или целенаправленной фортификации продуктов этой группой ингредиентов, набирающей популярность в мировой практике [11–14].

Выявление примеси животных жиров немолочного происхождения затруднено вследствие отсутствия различий в стериновом составе [9,10], поэтому их идентификация требует последовательного выполнения большего количества анализов. Сначала оценивают жирнокислотный состав жировой фазы продукта; при выявлении в нем отклонений определяют стериновый состав. В случае отсутствия фитостеринов, являющихся маркерами добавленных растительных жиров, анализируют триглицеридный состав. Известна вариабельность молочного жира по триглицеридному составу, что связано с влиянием многих факторов, включая рационы кормления, сезон года, породу животных, особенности трансформации жира в процессе переработки молока на отдельные молочные продукты [15–17]. При оценке триглицеридного состава важным является правильный выбор образца сравнения молочного жира со стандартизованными диапазонами триглицеридов. В связи с этим достоверное определение фальсификации по данному показателю становится весьма сложным как в техническом исполнении, так и в интерпретации полученных результатов, особенно в части небольших добавлений животного жира немолочного происхождения [18]. Поэтому продолжаются исследования по разработке альтернативных методов выявления фальсификации, основанных на различных подходах, включая применение более доступных способов оценки качества продукции и внедрение инновационных решений.

Так, например, отдельные авторы рассматривают вопрос быстрого выявления фальсификации немолочных жиров с помощью люминесцентного исследования, не требующего специальной подготовки [19]. Было показано, что фальсифицированная растительными жирами молочная продукция при просмотре в ультрафиолетовом излучении с длиной волны 365 нм люминесцирует ярким голубым цветом, а натуральная имеет желтое свечение. Это позволило рекомендовать данный метод в качестве скринингового для выявления фальсификаций молочных и молочных составных продуктов растительными жирами.

Амелиным В. Г. и соавторами [20] предложена аутентификация молочной продукции по аналитическому сигналу в цветометрической системе RGB при регистрации флуоресценции образцов под воздействием монохроматического ультрафиолетового света при той же длине волны 365 нм.

Статья [21] посвящена исследованию сочетания оптических и хемометрических методов оценки сливочного масла на предмет наличия немолочных жиров в виде пальмового масла. Авторами была сформирована база данных ИК-спектров масла, применены алгоритмы многомерной регрессии и произведен выбор спектрального интервала, наиболее чувствительного к фактору фальсификации.

Имеются сведения о применении дифференциально-сканирующей калориметрии для выявления фальсификации масла [22], а также методов оценки состава трансизомеров жирных кислот [23]. Синявский Ю. А. и др. в дополнение к определению жирнокислотного состава использовали оценку фосфолипидного состава сливочного масла. Исследованиями показано, что методом спектрального анализа в диапазоне длин волн 200–400 нм можно установить факт фальсификации по отсутствию или слабой выраженности пика фосфолипидов в спектре.

Рядом ученых была предпринята попытка оценить возможность применения для этих целей рамановской спектроскопии [24]. Этот метод представляет собой экспрессный неразрушающий и универсальный метод анализа для идентификации объектов в биологии, медицине, фармации, криминалистике, геммологии и пищевой промышленности [25–28]. Он отличается информативностью и эффективностью, не требует затрат на пробоподготовку и специальные реактивы. По этой причине его рассматривают в качестве альтернативного метода в сравнении с традиционными физико-химическими методами анализа.

Спектрометрические методы основаны на поглощении, излучении или рассеянии в результате взаимодействия электромагнитного излучения с веществом [25]. Электромагнитное излучение, попадая на образец, способствует переходу электронов в состояние с большей энергией. Эти переходы становится возможным зафиксировать в ультрафиолетовом или видимом диапазоне, вращательные переходы — в микроволновой области, молекулярные и колебательные переходы — в инфракрасной области [26]. Рамановская спектрометрия основана на явлении неупругого рассеяния монохроматического излучения, которое возникает в результате воздействия фотонов светового пучка с молекулами исследуемого образца. Это рассеянное излучение имеет отличающуюся от падающего излучения энергию, его характеризуют как комбинационное рассеяние [26,27].

Метод рамановской спектрометрии был применен исследователями для установления различий между натуральным сливочным маслом и продуктами, фальсифицированными свиным жиром и маргарином. Также метод использовали для выявления различий между маслом, полученным из молока лактирующих животных с разным типом кормления [24]. С его помощью выявляли подлинность детских молочных смесей, йогурта и сыра [29], определяли фальсификацию сухого молока сывороткой, крахмалом и мальтодекстрином, меламином и мочевиной [30–32], изучали фактор влияния тепловой нагрузки на качество пастеризованного обезжиренного молока [33,34] и изменения содержания лактозы в молоке [35,36]. Наибольший интерес представляет вопрос о возможности использования данного метода для выявления фальсификации масла и других молочных продуктов говяжьим жиром.

Необходимо отметить, что сам по себе говяжий жир характеризуется высокой пищевой ценностью и при условии хорошей очистки обладает приемлемыми органолептическими показателями для жира пищевого назначения. В связи с этим он может использоваться для фальсификации молочной продукции. Вместе с тем особенности его состава предопределяют отличительные физико-химические свойства этого жира [37–39]. В отличие от молочного жира он имеет более высокое содержание насыщенных жирных кислот. Следствием этого является более высокая степень насыщенности триглицеридов и повышенная температура плавления [39]. По этой причине говяжий жир имеет замедленное таяние, что может негативно сказаться на органолептических свойствах продукта, создавая ощущения повышенной вязкости и обволакиваемости. Особенности жирнокислотного состава также могут проявиться в константах, характеризующих природу жира (число Рейхерта–Мейссля, йодное число и пр.), а также в кислотности жировой фазы продукта. Комплексная оценка влияния говяжьего жира на жировую фазу фальсифицированных молочных продуктов с применением традиционных и новых методов исследований способствует выявлению новых подходов к обнаружению говяжьего жира в составе продукта.

Целью исследований является определение влияния добавленного говяжьего жира на изменение комплекса показателей качества жировой фазы молочного продукта для последующего выбора перспективных дополнительных методов его идентификации.

2. Объекты и методы

2.1. Объекты исследований

Объектами исследования служили модельные образцы жировой фазы молочного продукта, фальсифицированного добавлением говяжьего жира. Их оценивали в сравнении с натуральным молочным жиром и образцами говяжьего жира, характеристики которых приведены ниже:

- молочный жир (МЖ), выделенный из сладкосливочного масла Традиционного с массовой долей жира 82,5 %, произведенного по ГОСТ 32261-2013[1] из сливок коровьего молока;
- говяжий жир № 1 (ГЖ № 1) по ГОСТ 25292-2017[2]. Состав: жир животный пищевой топленый говяжий (высший сорт), антиокислитель Е321;
- говяжий жир № 2 (ГЖ № 2) по документу изготовителя. Состав: жир животный пищевой, говяжий высшего сорта, комплексная пищевая добавка (эмульгаторы Е471, Е472, Е322, ароматизатор «Масло сливочное тип "Вологодское"»);
- опытные модели жировой фазы фальсифицированного продукта с различным соотношением молочного и говяжьего жиров;
- образцы на основе молочного жира и говяжьего жира № 1: № 3 — с соотношением МЖ/ГЖ 95/5; № 4–90/10; № 5–85/15; № 6–80/20; № 7–75/25; № 8–70/30;
- образцы на основе молочного жира и говяжьего жира № 2: № 10 — с соотношением МЖ/ГЖ 95/5; № 11–90/10; № 12–85/15; № 13–80/20; № 14–75/25; № 15–70/30.

2.2. Методы исследований

При проведении исследований применялись следующие методы:

Органолептические показатели оценивали по ГОСТ 33632-2015[3] (при анализе молочного жира и опытных модельных смесей жировой фазы фальсифицированного продукта) и по ГОСТ 8285-91[4] (при анализе контрольных образов говяжьего жира). Оценку проводила группа из пяти аттестованных экспертов. Дополнительно к общей оценке вкуса и запаха по 10-балльной шкале описывали основные характеристики объекта с применением профильно-дескрипторного метода. В качестве основных дескрипторов были выбраны характеристики, наиболее полно отражающие выявленные привкусы и запахи. Их оценивали по 5-балльной шкале в зависимости от степени выраженности.

Температура плавления жира определялась по ГОСТ 32189-2013[5]; кислотность жировой фазы — по ГОСТ Р 55361-2012[6]; число Рейхерта–Мейссля — по ГОСТ Р 70238-2022[7]; йодное число устанавливалось по ГОСТ ISO 3961-2020[8] с использованием химического метода Вийса и расчетным методом с применением коэффициентов, приведенных в Таблице 1 [39].

Таблица 1. **Коэффициенты пересчета ненасыщенных жирных кислот**

Table 1. **Conversion factors for unsaturated fatty acids**

Жирная кислота	Коэффициент пересчета
Миристолеиновая $C_{14:1}$	1,056
Пальмитолеиновая $C_{16:1}$	0,946
Олеиновая $C_{18:1}$	0,856
Линолевая $C_{18:2}$	1,725
Линоленовая $C_{18:3}$	2,605

[1] ГОСТ 32261-2013 «Масло сливочное. Технические условия». — М.: Стандартинформ, 2014. — 17 с.

[2] ГОСТ 25292-2017 «Жиры животные топленые пищевые. Технические условия». — М.: Стандартинформ, 2014. — 12 с.

[3] ГОСТ 33632-2015 «Молочный жир, масло и паста масляная из коровьего молока. Методы контроля органолептических показателей». — М.: Стандартинформ, 2016. — 17 с.

[4] ГОСТ 8285-91 «Жиры животные топленые. Правила приемки и методы испытания». — М.: Стандартинформ, 2005. — 10 с.

[5] ГОСТ 32189-2013 «Маргарины, жиры для кулинарии, кондитерской, хлебопекарной и молочной промышленности. Правила приемки и методы контроля». — М.: Стандартинформ, 2014. — 35 с.

[6] ГОСТ Р 55361–2012 «Жир молочный, масло и паста масляная из коровьего молока. Правила приемки, отбор проб и методы контроля». — М.: Стандартинформ, 2014. — 42 с.

[7] ГОСТ Р 70238–2022 «Молоко и молочная продукция. Метод идентификации состава жировой фазы и определение массовой доли молочного жира». — М.: Стандартинформ, 2013. — 20 с.

[8] ГОСТ ISO 3961–2020 «Жиры и масла животные и растительные. Определение йодного числа». — М.: Стандартинформ, 2020. — 13 с.

Определение жирнокислотного состава проводили методом газовой хроматографии по ГОСТ 31665-2012[9] и ГОСТ 31663-2012[10] на хроматографическом комплексе на хроматографическом комплексе «Хромос ГХ-1000» (ООО «Хромос», Россия) с пламенно-ионизационным детектором и кварцевой капиллярной колонкой CP — Sil 88 for FAME 100 m × 0.25 mm × 0.2 μm (Agilent Technologies, США). В качестве идентификационной смеси использовали смесь метиловых эфиров жирных кислот Supelco 37 FAME Mix (Sigma-Aldrich, США). Обработку полученных данных проводили методом внутренней нормализации с помощью программы «Хромос».

Математическую обработку полученных данных органолептических и физико-химических показателей исследуемых объектов и построение графиков осуществляли с использованием компьютерной программы Microsoft Excel 2016. Исследования проводили в 3-кратной повторности. Значения показателей для каждого образца представляли в виде среднего значения и стандартного отклонения «Mean ± SD». Для оценки статистически значимых различий между образцами применяли двухфакторный дисперсионный анализ с повторениями ANOVA. Для проведения парного сравнения выборок использовали апостериорный критерий Тьюки. Статистически значимый результат оценивали при $p \leqslant 0{,}05$.

Рамановская спектроскопия проводилась на конфокальном спектрометре Renishaw inVia Reflex (Renishaw plc, Wotton-under-Edge, Великобритания). В качестве источника лазерного излучения использовался лазер с длиной волны 785 нм. Калибровку спектрометра перед каждым исследованием выполняли путем регистрации спектра комбинационного рассеяния кремниевой кристаллической пластины при 520 $см^{-1}$. Часть образца размером не более 5 × 5 × 5 мм располагали на предметном стекле, обернутом алюминиевой фольгой, и размещали на предметном столике микроскопа спектрометра. Для фокусировки лазера на поверхности образцов применяли объектив с увеличением L50×. Сбор спектров проводили при мощности лазера 100 мВт, время экспозиции 10 с, 3 аккумуляции. Измеряли не менее 10 спектров с разных точек образца в диапазоне обнаружения 800–1800 $см^{-1}$. Применяемую мощность лазера, время экспозиции, количество аккумуляций тщательно оптимизировали во избежание наступления фотодеградации материала и для получения записи наиболее информативного спектра.

Предварительную обработку спектров, которая включала коррекцию базовой линии с использованием интеллектуальных полиномиальных алгоритмов, сглаживание с применением алгоритма Савицкого-Голея [40] и нормализацию, выполняли в программе Renishaw WiRE 5.2 (Renishaw plc, Wotton-under-Edge, UK).

Также проводили анализ образцов по жирнокислотному профилю (Oil shape, OS), определяемому на основе данных спектроскопии, согласно методике, изложенной в [41]. На первом этапе определяли девять соотношений интенсивностей сигналов 970 $см^{-1}$, 1265 $см^{-1}$, 1650 $см^{-1}$, 1300 $см^{-1}$, 1440 $см^{-1}$ и 1747 $см^{-1}$: $I_1 = I_{970}/I_{1265}$, $I_2 = I_{970}/I_{1440}$, $I_3 = I_{970}/I_{1747}$, $I_4 = I_{1265}/I_{1300}$, $I_5 = I_{1265}/I_{1440}$, $I_6 = I_{1265}/I_{1747}$, $I_7 = I_{1650}/I_{1300}$, $I_8 = I_{1650}/I_{1440}$, $I_9 = I_{1650}/I_{1747}$.

Показатель *OS* рассчитывали по формуле:

$$OS = \sqrt[9]{\prod_{x=1}^{9} \times I_x} \text{ (усл. ед.)}, \quad (1)$$

где I_x — соотношение интенсивностей сигналов (от I_1 до I_9).

Числовые характеристики спектров (наименование пиков, их площадь, высота, ширина, интенсивность) обрабатывали в Microsoft Excel 2016. Обработка данных методом PCA проводилась в программе Origin Pro 2021 (OriginLab Corporation). Сравнение полученных результатов осуществляли в программе Statistica 10.0 с помощью непараметрического теста Краскела–Уоллиса с использованием критерия Данна. Различия считали достоверными и признавали наличие связи между показателями на уровне вероятности, не превышающей 0,05.

3. Результаты и обсуждение

3.1. Органолептические показатели

Данные органолептической оценки вкуса и запаха исследованных образцов приведены на Рисунке 1. Экспертами выявлено, что контрольные образцы молочного и говяжьего жиров обладали

[9] ГОСТ 31665-2012 «Масла растительные и жиры животные. Получение метиловых эфиров жирных кислот». — М.: Стандартинформ, 2013. — 8 с.

[10] ГОСТ 31663-2012 «Масла растительные и жиры животные. Определение методом газовой хроматографии массовой доли метиловых эфиров жирных кислот». — М.: Стандартинформ, 2013. — 8 с.

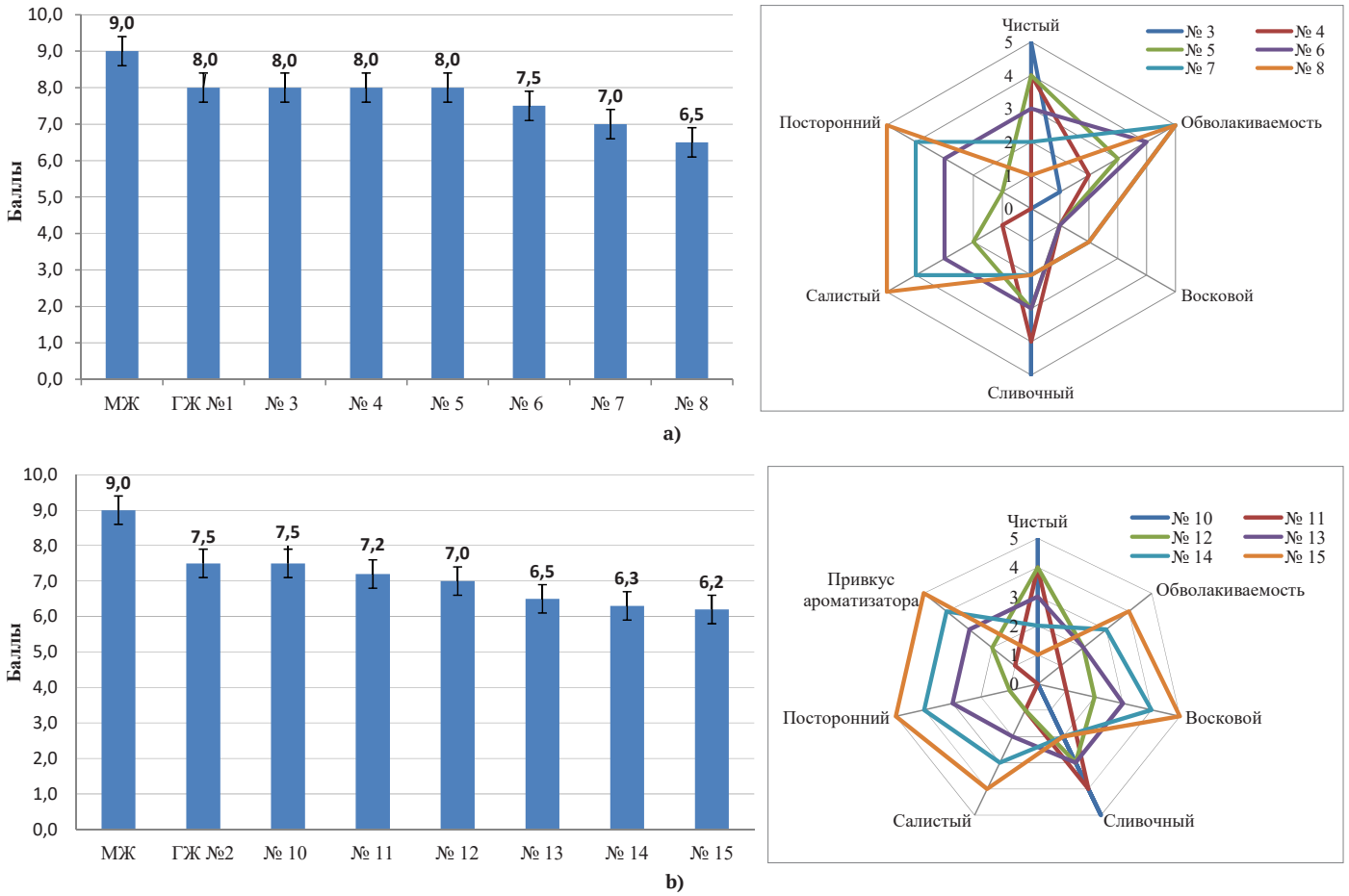


Рисунок 1. **Диаграммы органолептической оценки (в баллах) и дескрипторов вкуса контрольных образцов моделей жировой фазы продукта с говяжьим жиром № 1 a) и говяжьим жиром № 2 b)**

Figure 1. **Organoleptic score and flavor descriptor diagrams for control samples and the model samples of the fat phase of the product with beef fat No.1 a) and beef fat No.2 b)**

чистым вкусом с характерными привкусами для данных видов жиров с присвоением высоких балловых оценок (на уровне 8–9 баллов).

Молочный жир характеризовался чистым вкусом с легким привкусом вытопленного жира. В говяжьем жире № 1 отмечен чистый вкус с легким характерным привкусом говяжьего жира, вытопленного из свежего сырья, а в образце № 2 этот привкус был нивелирован ароматизатором, входящим в его состав. При этом балловая оценка образца говяжьего жира № 2 была снижена за счет излишней выраженности ароматизатора с профилем, отличающимся от натурального молочного жира и указанного в маркировке типа ароматизатора. Исследованные говяжьи жиры также отличались от молочного более замедленным таянием, создающим ощущение обволакиваемости. Большая ее выраженность проявлялась в образце ГЖ № 2.

В моделях жировой фазы фальсифицированного продукта по мере увеличения дозы внесения говяжьего жира № 1 (Рисунок 1a) отмечалась более выраженная интенсивность привкуса добавленного жира, которая при дозе 5–10 % была охарактеризована экспертами как легкий посторонний привкус и ощущение обволакиваемости. Эти характеристики при увеличении дозы внесения до 30 % переросли в посторонний и салистый привкусы на фоне снижения выраженности сливочного вкуса вследствие уменьшения доли молочного жира. По мере увеличения дозы внесения говяжьего жира № 2 (Рисунок 1b) сначала появилось замедленное таяние и слабая обволакиваемость, которые далее переросли в выраженную обволакиваемость и восковой привкус; одновременно усиливался посторонний привкус, связанный с большей выраженностью привкуса нетипичного ароматизатора.

Проявление характерных привкусов в виде воскового, обволакиваемости и салистости можно связать, в первую очередь, с достоверными различиями в температурах плавления молочного жира и исследованных образцов говяжьего жира (Таблица 2). Причем это различие более заметно в отношении образца говяжьего жира № 2. Однако вследствие нивелирования ароматизатором указанные привкусы отмечены дегустаторами при более высокой дозе его внесения — 10–15 %.

Таблица 2. **Показатели температуры плавления жировой фазы исследованных образцов**

Table 2. **Melting point values of the fat phase of the studied samples**

Доля ГЖ в смеси, %	Показатель температуры плавления, °С		
	МЖ (контроль)	ГЖ № 1	ГЖ № 2
	33,5 ± 3,4^{ab}	41,5 ± 4,2^{a}	44,0 ± 4,4^{b}
5	—	34,0 ± 3,4	34,0 ± 3,4
10	—	34,5 ± 3,5	34,5 ± 3,5
15	—	35,0 ± 3,5	35,5 ± 3,6
20	—	35,5 ± 3,6	36,5 ± 3,7
25	—	36,0 ± 3,6	37,0 ± 3,7
30	—	36,5 ± 3,7	38,0 ± 3,8

Примечание: данные приведены в форме «среднее значение ± стандартное отклонение». Одинаковой буквой обозначены образцы, имеющие достоверные различия с контрольным образцом молочного жира ($p \leqslant 0,05$). Остальные показатели в столбцах не различаются с контролем ($p > 0,05$).

Несмотря на достоверные различия в температурах плавления говяжьего и молочного жира при исследованных дозах внесения говяжьего жира, достоверного различия данного показателя в жировых смесях не выявлено. Это связано с высокой погрешностью этого метода оценки. Следовательно, влияние на органолептический профиль жировой фазы проявляется раньше, чем выявляются различия по температуре плавления жира, что согласуется с данными [42].

3.2. Физико-химические показатели

Кислотность жировой фазы рассматривается исследователями [10] как показатель предварительного выявления фальсификации жировой фазы молочной продукции в случае, если он имеет пониженное значение. Это связано с тем, что в процессе изготовления немолочные жиры, используемые для пищевых целей,

проходят последовательные процессы технологической обработки, направленные в т.ч. на удаление из жира свободных жирных кислот (СЖК) [37–39]. Последние привносят посторонние привкусы в жировое пищевое сырье, тем самым снижая его технологичность и возможность использования в более высоких дозах внесения, поэтому их удаление считается важной технологической задачей при получении жиров высокой степени очистки. Динамика изменения кислотности жировой фазы как показателя, отражающего наличие СЖК в исследуемых образцах, приведена на Рисунке 2.

Анализ изменения кислотности жировой фазы образцов (Рисунок 2) показывает, что, несмотря на существенные различия показателя у говяжьих и молочного жиров, достоверные различия ($p \leqslant 0,05$) в жировой фазе продукта по данному показателю в рамках эксперимента обнаружены только при замещении молочного жира говяжьим жиром № 1 на 25–30 % и говяжьим жиром № 2 на 20–30 %. При этих уровнях замещения кислотность снижалась до 1,3–1,4 °К. Вместе с тем известно, что колебание кислотности молочного жира может быть более вариабельно (от 1,2 до 3,5 °К) [39,42]. Поэтому чем меньше различие между кислотностями молочного жира и используемого для фальсификации говяжьего жира, тем меньше вероятность его обнаружения в жировой фазе фальсифицируемого продукта по данному показателю.

Изменение физико-химических констант жировой фазы по мере увеличения доли добавленного говяжьего жира приведено в Таблице 3. В качестве констант для сравнения взяты йодное число, характеризующее степень ненасыщенности жира, и число Рейхерта–Мейсля, характеризующее наличие в нем низкомолекулярных летучих жирных кислот.

Выявлены статистически значимые различия показателя йодного числа молочного жира и говяжьих жиров № 1 и № 2 ($p \leqslant 0,05$), что объяснимо разницей в содержании насыщенных и ненасыщенных жирных кислот в данных жирах. Для молочного жира суммарное содержание основных ненасыщенных жирных кислот было в 1,53 раза ниже, чем в говяжьем жире № 1, и в 1,31 раза ниже, чем в говяжьем жире № 2. Исследованные говяжьи жиры характеризовались повышенным содержанием пальмитолеиновой и олеиновой жирных кислот, что отразилось на показателе йодного числа, полученном как расчетным, так и химическим методами. В моделях жировой фазы продукта, содержащего говяжьи жиры, значимое различие йодного числа с показателями молочного жира выявлено при внесении 10 % ГЖ № 1 и 15 % ГЖ № 2 и более.

Различие в показателях числа Рейхерта–Мейсля в данном эксперименте выявилось при внесении 5 % говяжьих жиров за счет существенной разницы в содержании низкомолекулярных летучих жирных кислот (масляной, капроновой, каприновой и каприловой). В молочном жире их содержание составило 8,3 %, в говяжьи жирах они практически отсутствовали. Однако следует отметить, что для молочного жира существует стандартизованный диапазон числа Рейхерта–Мейсля, который составляет от 20 до 35 (ГОСТ Р 70238-2022[8]). Следовательно, для фальсифицированного продукта, находящегося в обороте, обоснованное заключение о наличии немолочного жира в жировой фазе может быть дано, если значение данного показателя будет ниже 20. В рамках выполненного эксперимента это соответствует дозе внесения говяжьего жира более 15 %.

Таблица 3. **Физико-химические показатели жировой фазы исследованных образцов**

Table 3. **Physicochemical parameters of the fat phase of the studied samples**

№ образца	Йодное число, г J_2/100 г		Число Рейхерта-Мейссля, см^3
	расчетным методом	методом Вийса	
1	34,77 ± 0,66^{ab}	34,75 ± 0,43^{ab}	23,52 ± 0,47^{ab}
2	49,60 ± 0,83^{a}	49,60 ± 0,50^{a}	0,60 ± 0,01^{a}
3	35,51 ± 0,66	35,48 ± 0,43	22,42 ± 0,45^{a}
4	36,24 ± 0,69^{a}	36,08 ± 0,42^{a}	21,56 ± 0,43^{a}
5	36,99 ± 0,66^{a}	36,88 ± 0,45^{a}	20,91 ± 0,42^{a}
6	37,74 ± 0,65^{a}	37,44 ± 0,43^{a}	20,34 ± 0,41^{a}
7	38,48 ± 0,70^{a}	38,04 ± 0,45^{a}	17,57 ± 0,35^{a}
8	39,23 ± 0,66^{a}	39,49 ± 0,48^{a}	16,04 ± 0,32^{a}
9	42,85 ± 0,71^{b}	42,85 ± 0,50^{b}	0,60 ± 0,01^{b}
10	35,57 ± 0,66	35,40 ± 0,48	22,42 ± 0,45^{b}
11	35,68 ± 0,68	35,67 ± 0,47	21,35 ± 0,43^{b}
12	35,82 ± 0,66^{b}	35,95 ± 0,49^{b}	20,78 ± 0,42^{b}
13	36,08 ± 0,66^{b}	36,22 ± 0,50^{b}	19,06 ± 0,38^{b}
14	36,58 ± 0,66^{b}	37,23 ± 0,48^{b}	17,39 ± 0,35^{b}
15	37,20 ± 0,66^{b}	37,23 ± 0,50^{b}	15,85 ± 0,32^{b}

Примечание: данные приведены в форме «среднее значение ± стандартное отклонение». Данные, обозначенные в столбцах одинаковыми буквами, имеют статистически значимые различия с контрольным образцом молочного жира ($p \leqslant 0,05$).

3.3. Жирнокислотный состав

Различия в жирнокислотном составе молочного жира и исследованных говяжьих жиров, а также моделей жировой фазы фальсифицированных продуктов приведены на Рисунке 3. В первом образце ГЖ повышено суммарное содержание ненасыщенных жирных кислот по отношению к молочному жиру при доминировании олеиновой кислоты. Данное изменение может обусловливать формирование олеистых или салистых оттенков вкуса. Повышенная доля стеариновой кислоты, в свою очередь, способна вызывать появление легкого обволакивающего ощущения при увеличении дозировки ГЖ.

Во втором образце ГЖ также отмечено увеличение суммы ненасыщенных жирных кислот по сравнению с молочным жиром. Основной компонент — олеиновая кислота, однако ее содержание ниже, чем в жире № 1, что позволяет ожидать менее выраженное проявление олеистых и салистых вкусовых оттенков. Вместе с тем концентрация стеариновой кислоты во втором образце в 1,5 раза выше, чем в жире № 1, и в 1,9 раза превышает ее уровень в молочном жире. Это может приводить к более выраженной тугоплавкости, усилению обволакивающего эффекта и формированию характерного свечного (воскового) привкуса. Указанные предположения согласуются как с повышением температуры плавления, так и с результатами органолептической оценки [42].

Дисперсионный анализ выявил значимые различия ($p \leqslant 0,05$) жирнокислотного состава образцов говяжьего жира от молочного практически по всему спектру жирных кислот, за исключением

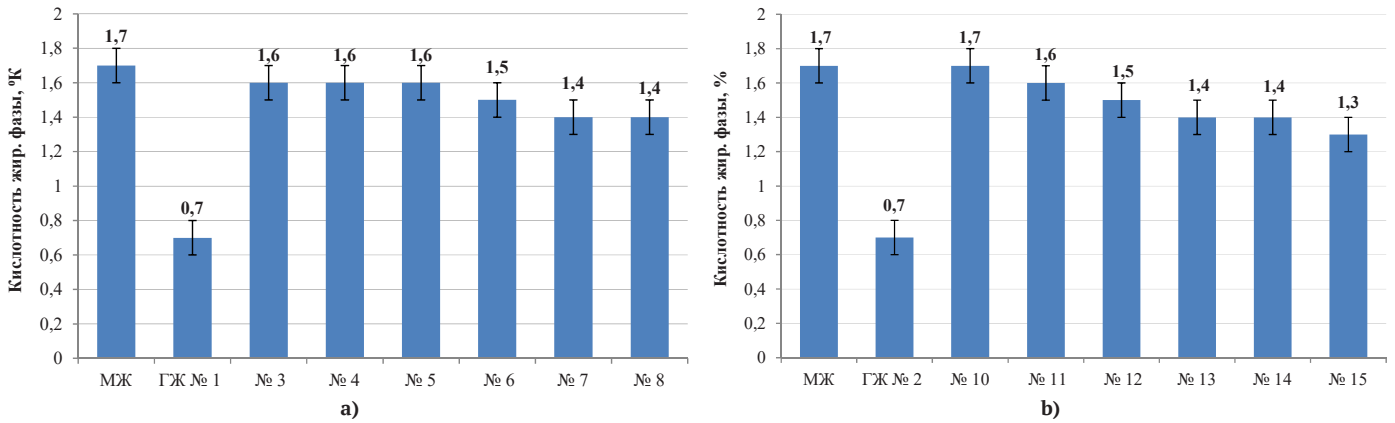


Рисунок 2. **Динамика изменения кислотности жировой фазы продукта (°К) при внесении говяжьего жира в количестве от 5 % до 30 % при использовании ГЖ № 1 (a) и ГЖ № 2 (b)**

Figure 2. **Dynamics of changes in the acidity of the fat phase of the product (°K) when adding beef fat (BF) in quantities from 5 % to 30 % using BF No. 1 (a) and BF No. 2 (b)**



Рисунок 3. **Изменение жирнокислотного состава образцов при использовании говяжьего жира № 1 и № 2 с долей в смеси 5, 10, 15, 20, 25, 30%, где: a) низкомолекулярные жирные кислоты; b) насыщенные жирные кислоты; c) ненасыщенные жирные кислоты**

Figure 3. **Changes in the fatty acid composition of the samples when using beef fat No.1 and No.2 with a proportion in the mixture of 5, 10, 15, 20, 25, 30%, where: a) low molecular weight fatty acids; b) saturated fatty acids; c) unsaturated fatty acids**

минорных (арахиновой и бегеновой). Наиболее существенные различия ГЖ № 1 и ГЖ № 2 от молочного выявлены в содержании низкомолекулярных ЖК, миристиновой, стеариновой и олеиновой кислот. Важно отметить, что говяжьи жиры характеризовались повышенным содержанием стеариновой и олеиновой кислот, что коррелирует с появлением в образцах жировой фазы с их добавлением обволакиваемости, салистого и воскового привкусов.

При существенных различиях в жирнокислотном составе самих жиров в их смесях различия проявились по-разному, в зависимости от жирных кислот и вида использованного жира:

- по стеариновой кислоте — достоверное различие с молочным жиром выявлено при дозе внесения ГЖ № 1 и ГЖ № 2 в количестве 5 % и более;
- по олеиновой кислоте — при дозе внесения ГЖ № 1 и ГЖ № 2 в количестве 5 % и более;
- по лауриновой и миристиновым кислотам — значимое различие выявлено при 10 % и более внесения говяжьих жиров;
- по низкомолекулярным (масляная кислота, каприновая), деценовой, миристолеиновой и линолевой кислотам — при дозе 15 % и более;
- по капроновой и пальмитолеиновой кислотам — при дозе 20 % и более;
- по каприловой — 25 % и более.

Соотношения метиловых эфиров жирных кислот для говяжьих жиров, рассчитанные на основе жирнокислотного состава, существенно отличаются от соотношений, характерных для молочного жира (Таблица 4). В таблице приведены актуальные соотношения и их нормативные значения согласно ГОСТ Р 52253-2025[11], вводимые в действие с 2027 года с правом досрочного применения. Дополнительно к ранее установленным пяти соотношениям введено дополнительно соотношение $C_{18:0}/C_{14:0}$, чувствительное к использованию для фальсификации жиров с повышенным содержанием стеариновой кислоты и пониженным содержанием миристиновой кислоты.

[11] ГОСТ Р 52253-2025 «Масло и паста масляная из молока сельскохозяйственных животных. Общие технические условия». — М.: Стандартинформ, 2014. — 42 с.

В моделях фальсифицированного продукта отклонения от нормы проявились при разных соотношениях МЖ/ГЖ, что видно из данных Таблицы 5. Это связано с отличительными особенностями ЖКС, использованных в эксперименте жиров.

При использовании ГЖ № 1 отклонения от нормы по двум коэффициентам соотношений выявлены при его добавлении в молочный жир в количестве 15 % и 20 %, отклонения по 4 коэффициентам — при более высокой дозе его внесения (25–30 %). Два соотношения остались нечувствительны к изменению ЖКС, а вновь введенное соотношение ($C_{18:0}/C_{14:0}$) указало на изменение ЖКС уже при 5 % добавленного жира.

В случае использования ГЖ № 2 наиболее чувствительным оказалось также соотношение $C_{18:0}/C_{14:0}$. Соотношение $C_{18:0}/C_{12:0}$ выявило отклонение при дозе внесения говяжьего жира более 20 %, соотношение $C_{18:1}/C_{14:0}$ — при 30 % внесенного жира. Из-за снижения содержания миристиновой и повышения содержания стеариновой кислот при внесении ГЖ № 2 в количестве 5 % по вновь введенному соотношению МЭЖК $C_{18:0}$ к $C_{14:0}$ 0,5–1,3 было выявлено несоответствие этого показателя, который и дальше возрастал по мере увеличения дозировки ГЖ. Три соотношения остались нечувствительны к изменению ЖКС.

3.4. Рамановская спектроскопия

Анализ спектров образцов, полученных методом рамановской спектроскопии, показал, что основные полосы спектров соответствуют сигналам, обусловленным колебаниями насыщенных и ненасыщенных структур жирных кислот [43,44]: 1650 $см^{-1}$ для моды растяжения C=C (известной как мода ν(C=C)) от цис- двойных связей RHC=CHR; 1440 $см^{-1}$ для деформации ножничного изгиба δ(CH) группы $-CH_2$; 1265 $см^{-1}$ для деформации δ(C-H) от цис-двойных связей RHC=CHR; 1300 $см^{-1}$ для деформации δ(C-H) группы $-CH_2$; и 1747 $см^{-1}$ для моды растяжения (C=O) (известной как мода ν(C=O)) группы RC=OOR.

Сравнение спектров молочного жира и говяжьего жира № 1 выявило основные различия только в интенсивности одинаковых полос (Рисунок 4а), особенно в области 1650 $см^{-1}$, отвечающей за ненасыщенные связи жирных кислот. При сравнении спектра молочного жира с образцом говяжьего жира № 2 выявлены различия как

Таблица 4. **Показатели соотношений метиловых эфиров жирных кислот (МЭЖК) молочного жира (МЖ) и говяжьего жира (ГЖ № 1 и ГЖ № 2)**

Table 4. **Ratios of fatty acid methyl esters (FAME) of milk fat and beef fat No.1 and No.2**

Обозначение соотношений МЭЖК	Значение показателя			
	Нормативное значение по ГОСТ Р 52253-2025	МЖ	ГЖ № 1	ГЖ № 2
$C_{16:0}/C_{12:0}$	5,6–14,5	9,7	357,4	369,1
$C_{18:0}/C_{12:0}$	1,7–5,9	4,1	219,9	319,9
$C_{18:0}/C_{14:0}$	0,5–1,3	1,3	5,0	7,6
$C_{18:1}/C_{14:0}$	1,5–3,6	2,6	13,8	12,2
$C_{18:2}/C_{14:0}$	0,1–0,5	0,5	1,3	1,2
$(C_{18:1}+C_{18:2})/(C_{12:0}+C_{14:0}+C_{16:0}+C_{18:0})$	0,4–0,7	0,5	1,0	0,8

Таблица 5. **Изменение жирнокислотного состава жировой фазы продукта при использовании говяжьего жира**

Table 5. **Changes in the fatty acid composition of the fat phase of the product when using beef fat**

Обозначение соотношений МЭЖК	При внесении ГЖ № 1					
	№ 3	№ 4	№ 5	№ 6	№ 7	№ 8
$C_{16:0}/C_{12:0}$	10,2	10,7	11,2	11,8	12,5	13,3
$C_{18:0}/C_{12:0}$	4,6	4,9	5,2	5,6	**6,0**	**6,5**
$C_{18:0}/C_{14:0}$	**1,4**	**1,5**	**1,6**	**1,6**	**1,7**	**1,8**
$C_{18:1}/C_{14:0}$	2,8	3,0	3,2	3,4	**3,7**	**4,0**
$C_{18:2}/C_{14:0}$	0,5	0,5	**0,6**	**0,6**	**0,6**	**0,6**
$(C_{18:1}+C_{18:2})/(C_{12:0}+C_{14:0}+C_{16:0}+C_{18:0})$	0,5	0,5	0,6	0,5	0,6	0,6
	При внесении ГЖ № 2					
	№ 10	№ 11	№ 12	№ 13	№ 14	№ 15
$C_{16:0}/C_{12:0}$	9,8	10,1	11,0	11,7	12,3	13,6
$C_{18:0}/C_{12:0}$	4,3	4,7	5,4	5,9	**6,6**	**7,7**
$C_{18:0}/C_{14:0}$	**1,4**	**1,5**	**1,6**	**1,6**	**1,8**	**2,0**
$C_{18:1}/C_{14:0}$	2,8	2,9	3,0	3,1	3,4	**3,7**
$C_{18:2}/C_{14:0}$	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
$(C_{18:1}+C_{18:2})/(C_{12:0}+C_{14:0}+C_{16:0}+C_{18:0})$	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6

в интенсивности одинаковых сигналов, так и в появлении в образце ГЖ № 2 отчетливого раздвоения в области 1720–1760 $см^{-1}$, отвечающей за C=O связи в сложных эфирах жирных кислот (Рисунок 4c) [45], а также сигнала 1175 $см^{-1}$, характеризующего колебания карбонильно-сложноэфирной группы глицеринового остова в молекулах глицеридов [43] (Рисунок 4b). Между образцами говяжьего жира также были выявлены различия как в интенсивности одинаковых сигналов, так в сигнале 1175 $см^{-1}$ и раздвоении в области 1720–1760 $см^{-1}$ в образце ГЖ № 2, что, по- видимому, связано с большим количеством глицеридов и метиловых эфиров жирных кислот в образце за счет внесения эмульгаторов. Также можно отметить, что в образце ГЖ № 1 сигнал 1266 $см^{-1,}$ отвечающий за *cis*-изомеры жирных кислот, был интенсивнее, чем в образцах МЖ и ГЖ № 2. Колебания интенсивностей спектров в области 1040–1140 $см^{-1}$ связаны с разным количеством C–C связей в образцах. Gómez-Mascaraque L. G. и соавторы связывали интенсивность сигнала 1650 $см^{-1}$ с концентрацией α-линоленовой кислоты и конъюгированной линоленовой кислоты в сливочном масле [46]. В работе [26] отмечено, что колебания интенсивностей сигналов 1015, 1162 и 1525 $см^{-1}$, связанных с каротиноидами, зависит от породы коров при одинаковом пастбищном кормлении. При этом, как отмечено в работе [47], выявление нехарактерных для молока сигналов на рамановских спектрах

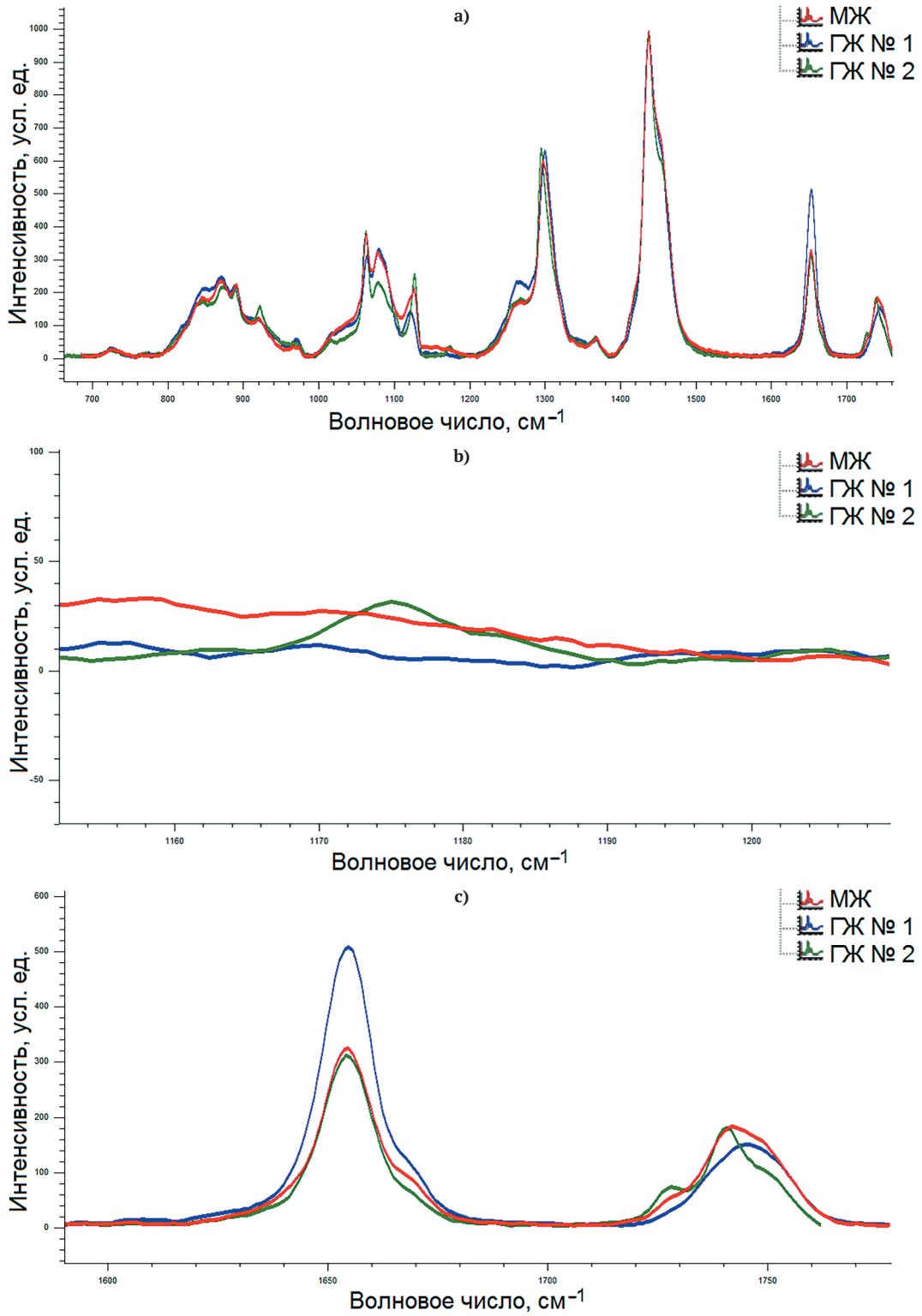


Рисунок 4. **Сравнение спектров молочного и говяжьего жиров:**
a) спектры в диапазоне 800–1800 $см^{-1}$; b) спектры в диапазоне 1160–1190 $см^{-1}$; c) — спектры в диапазоне 1600–1760 $см^{-1}$
Figure 4. **Comparison of spectra of milk and beef fats:**
a) spectra in the range of 800–1800 $см^{-1}$; b) spectra in the range of 1160–1190 $см^{-1}$; c) spectra in the range of 1600–1760 $см^{-1}$

связано с присутствием посторонних компонентов, например, меламин вызывает колебания триазинового кольца в областях около 680 и 980 $см^{-1}$.

Достоверность различий исследованных образцов молочного и говяжьего жиров подтверждена анализом полученных спектров методом главных компонент (PCA). Данный метод успешно использовали в работах [26] и [46] для классификации молока и сливочного масла от коров с разным рационом кормления, а в работе [34] — для дифференциации молока в зависимости от режимов пастеризации. Результаты PCA представлены на Рисунке 5. Было сформировано 15 главных компонент, первые шесть из которых объясняли 95,22% дисперсии. Первая главная компонента (PC1) описывала 44,10% дисперсии исходного набора данных, вторая (PC2) — 22,79%. Точки образцов группировались в разных областях графика и не имели пересечений. При этом точки, соответствующие ГЖ № 2, находились преимущественно в I квадранте (положительном по PC2 и отрицательном по PC1), ГЖ № 1 — во II (положительном по PC1 и PC2), а МЖ — в нижней части графика (отрицательная область по PC2) вблизи нулевого значения PC1.

Дальнейшее сравнение спектров проводили с учетом двух групп образцов со смешанным составом жировой фазы: первая группа (Группа 1) включала модели с ГЖ № 1, а именно образцы № 3–8. Вторая группа (Группа 2) включала образцы № 10–15. Эти образцы сравнивали с контрольными образцами (МЖ и ГЖ № 1 — для первой группы, и МЖ и ГЖ № 2 — для второй группы). Результаты приведены на Рисунке 6.

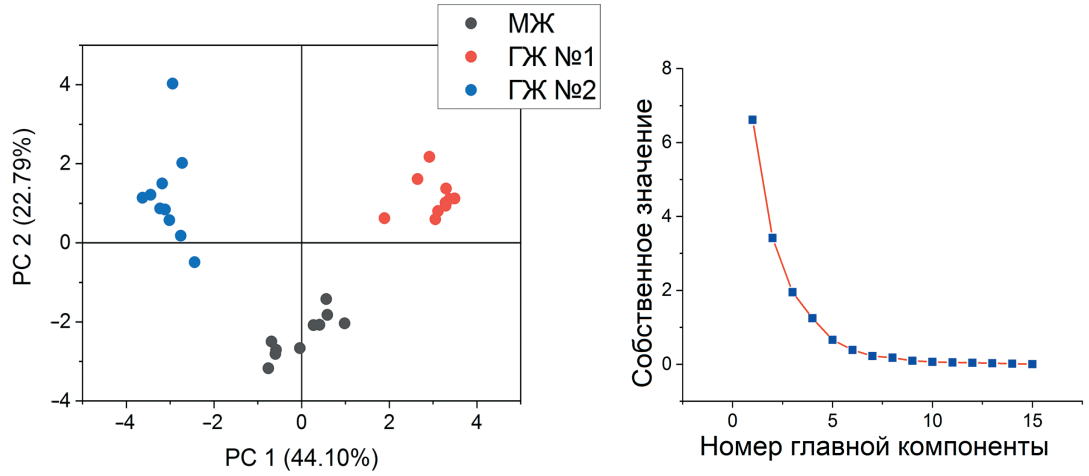


Рисунок 5. **Результаты PCA для образцов 1, 2, 9. PC1 vs PC2**
Figure 5. **PCA results for samples 1, 2, 9. PC1 vs PC2**

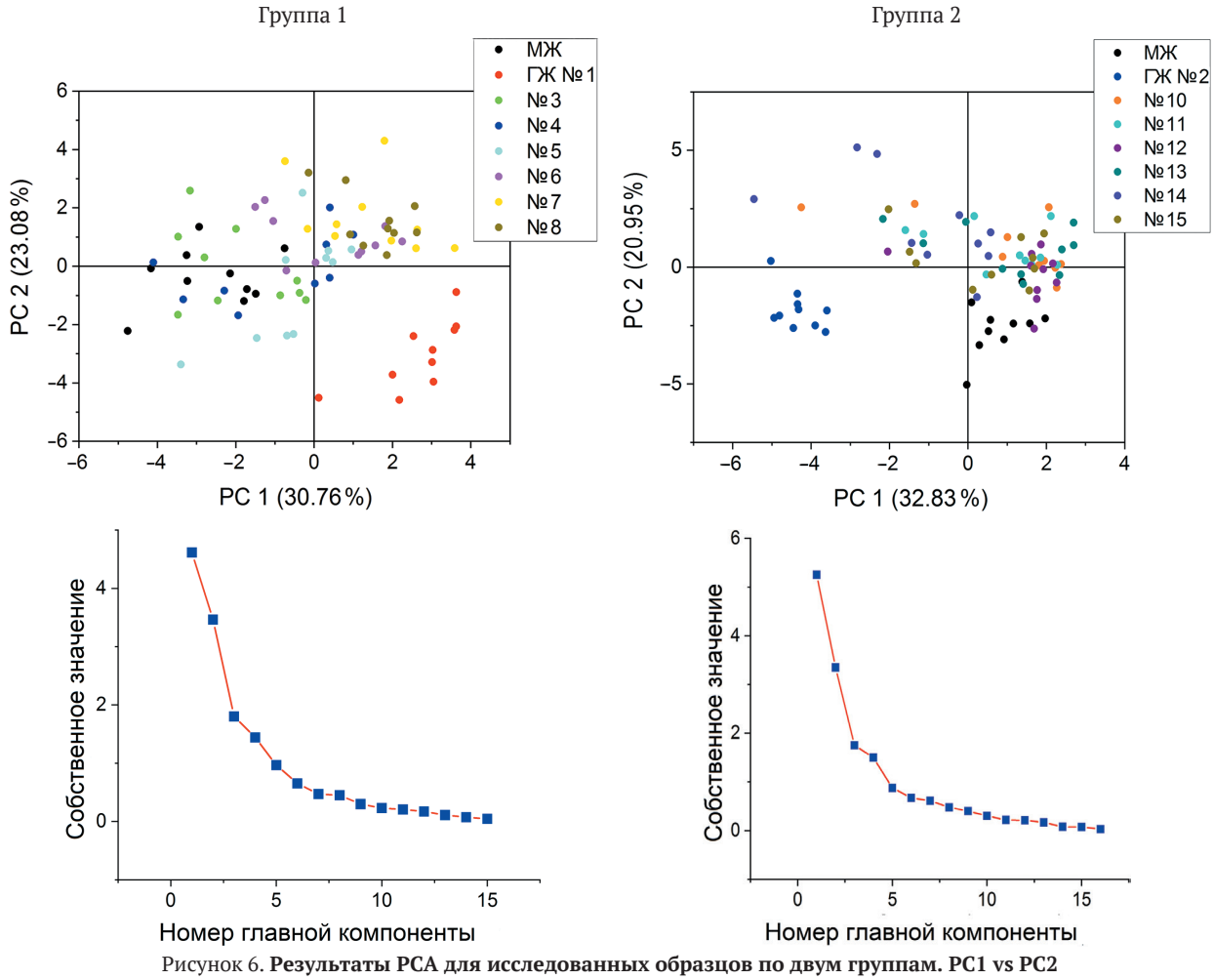


Рисунок 6. **Результаты PCA для исследованных образцов по двум группам. PC1 vs PC2**
Figure 6. **PCA results for the samples in two groups. PC1 vs PC2**

Для группы 1 было сформировано 15 главных компонент, первые семь из которых объясняли 89,42 % дисперсии. Первая главная компонента (PC1) описывала 30,76 % дисперсии исходного набора данных, вторая (PC2) — 23,08 %. Точки образцов № 1 и № 2 группировались в разных областях графика и не имели пересечений. При этом точки, соответствующие МЖ, находились в отрицательной области по PC1, а ГЖ № 1 — в квадранте, положительном по PC1 и отрицательном по PC2. Точки образцов № 3, № 4 и № 5 располагались ближе к точкам образца МЖ, а точки образцов № 6, № 7 и № 8 преимущественно смещались ко II квадранту, положительному по PC1 и PC2. Таким образом, можно отметить достоверное различие образцов по рамановским спектрам с внесением ГЖ № 1 более 25 %.

Для группы 2 было сформировано 16 главных компонент, первые семь из которых объясняли 87,49 % дисперсии. Первая главная компонента (PC1) описывала 32,83 % дисперсии исходного набора данных, вторая (PC2) — 20,95 %. Точки образцов МЖ и ГЖ № 2 также группировались в разных областях графика и не имели пересечений. При этом точки, соответствующие образцу МЖ, находились в отрицательной области по PC2, а образцу ГЖ № 2 — преимущественно в отрицательном по PC1 и PC2 квадранте. Точки образцов № 10–15 не имели четких областей расположения и преимущественно группировались в I, II и IV квадрантах графика. Таким образом, PCA рамановских спектров образцов с внесением ГЖ № 2 не позволил их достоверно отличить от МЖ. При этом следует отметить, что сигналы в области 1727 $см^{-1}$ и 1175 $см^{-1}$, стабильно присутствовавшие в образце ГЖ № 2, также обнаруживались на спектрах образцов № 10–15: это может являться идентификационным признаком присутствия в данных образцах говяжьего жира № 2. Однако использование данных пиков для идентификации говяжьего жира № 2 требует дальнейшего изучения.

Результаты анализа жирнокислотного профиля образцов, определяемого на основе данных рамановской спектроскопии, приведены на Рисунке 7. Наименьшее значение показателя OS, а, следовательно, и интенсивностей сигналов от ненасыщенных связей жирных кислот, было у образцов МЖ и ГЖ № 2, а наибольшее — у образца ГЖ № 1.

В ряду образцов № 3–8 по мере увеличения количества говяжьего жира № 1 по сравнению с образцом МЖ показатель OS также увеличивался (достоверные различия выявлены при внесении более 15 %, $p < 0,05$). В ряду № 10–15 жирнокислотный профиль не показал существенных различий между образцами, однако был достоверно выше ($p < 0,05$), чем в образцах МЖ и ГЖ № 2. Данные результаты согласуются с изменениями жирнокислотного состава образцов.

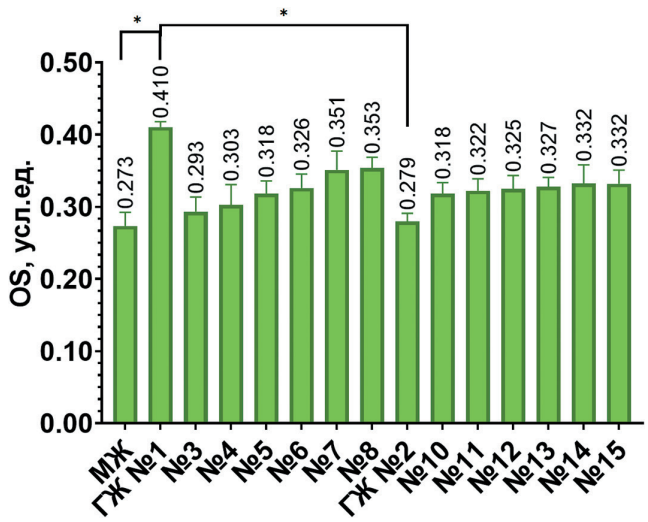


Рисунок 7. **Гистограмма полученных значений жирнокислотного профиля образцов, определяемого на основе данных рамановской спектроскопии**
(* — достоверные различия между МЖ, ГЖ № 1 и ГЖ № 2, $p < 0,05$)
Figure 7. **Histogram of the obtained values of the fatty acid profile of the samples, determined based on the data of Raman spectroscopy**
(* — significant differences between MF, BF № 1 and BF № 2, $p < 0.05$)

4. Выводы

В результате проведенных комплексных исследований образцов молочного жира, говяжьих жиров и их модельных смесей, включавших органолептическую, физико-химическую, хроматографическую и спектроскопическую оценку, сформулированы следующие выводы:

1. Показано, что органолептические характеристики жировой фазы являются высокочувствительным индикатором присутствия говяжьего жира в молочном жире и позволяют выявлять фальсификацию уже при дозах внесения 5–10 %, тогда как достоверные различия по температуре плавления фиксируются лишь при более высоких концентрациях и сопровождаются значительной погрешностью метода.
2. Установлено, что снижение кислотности жировой фазы может служить дополнительным диагностическим признаком фальсификации, однако информативность данного показателя ограничена высокой вариабельностью кислотности натурального молочного жира и проявляется преимущественно при замещении более 20–25 % молочного жира говяжьим.
3. Йодное число и число Рейхерта–Мейсля подтвердили высокую диагностическую значимость для выявления немолочного жира. Достоверные отклонения йодного числа от значений молочного жира выявлены при внесении 10 % ГЖ № 1 и 15 % ГЖ № 2. Снижение числа Рейхерта–Мейсля ниже нормативного уровня, позволяющее однозначно судить о фальсификации, наблюдалось при содержании говяжьего жира более 15 %.
4. Дисперсионный анализ показал наличие статистически значимых различий жирнокислотного состава говяжьих и молочного жиров практически по всему спектру жирных кислот. Наиболее информативными маркерами оказались содержание низкомолекулярных кислот и соотношения миристиновой, стеариновой и олеиновой кислот, коррелирующие с формированием обволакиваемости, салистых и восковых оттенков вкуса.
5. Метод рамановской спектроскопии в сочетании с анализом главных компонент подтвердил возможность дифференциации молочного и говяжьих жиров по спектральным признакам, а также возможность выявления ароматизированного говяжьего жира по характерным полосам в областях 1175 $см^{-1}$ и 1720–1760 $см^{-1}$.
6. Совокупность органолептических, физико-химических, хроматографических и спектроскопических методов обеспечивает надежную идентификацию фальсификации жировой фазы молочных продуктов, при этом наибольшей чувствительностью и воспроизводимостью обладают показатели жирнокислотного состава и соотношений МЭЖК, а также методы рамановской спектроскопии с последующей многомерной статистической обработкой.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК/ REFERENCES

1. Янковская, В. С., Дунченко, Н. И. (2024). Системный подход к обеспечению качества и безопасности пищевых продуктов на базе квалиметрии рисков. *Молочная промышленность*, 6, 59–62. [Yankovskaya, V. S., Dunchenko, N. I. (2024). Systematic approach to food quality and safety: Risk qualimetry. *Dairy Industry*, 6, 59–62. (In Russian)] https://doi.org/10.21603/1019-8946-2024-6-15
2. Матисон, А. В., Арутюнова, Н. И. (2016). Качество продуктов питания. *Пищевая промышленность*, 4, 50–54. [Matison, V. A., Arutyunova, N. I. (2016). Food quality. *Food Industry,* 4, 50–54. (In Russian)]
3. Тутельян В. А. (2021). Здоровое питание для общественного здоровья. *Общественное здоровье*, 1(1), 56–64. [Tutelyan, V. A. (2021). Healthy food for public health. *Public Health*, 1(1), 56–64. (In Russian)] https://doi.org/10.21045/2782-1676-2021-1-1-56-64
4. Синявский, Ю. А., Якунин, А. В., Туйгунов, Д. Н., Шарипбаева, А. Ш., Ережепов, А. Е. (2021). Оценка уровня фальсификации сливочного масла, представленного на рынке Республики Казахстан. *Пищевая промышленность*, 2, 25–29. [Sinyavskiy, Yu. A., Yakunin, A. V., Tuygunov, D. N., Sharipbaeva, A. Sh., Erejepov, A. E. (2021). Assessment of the level of falsification of butter on the market in Almaty. *Food Industry*, 2, 25–29. (In Russian)] https://doi.org/10.24412/0235-2486-2021-2-0013
5. Жилинкова, К. Б. (2021). Проблемы фальсификации молочной продукции и их влияние на рынок молока и состояние молочной отрасли. *Экономика. Информатика*, 48(4), 697–706. [Zhilinkova, K. B. (2021). The impact of counterfeit dairy products and surrogates on the milk market and the state of the dairy industry. *Economics. Information Technologies*, 48(4), 697–706. (In Russian)] https://doi.org/10.52575/2687-0932-2021-48-4-697-706
6. Бебнева, Я. О., Безродный, С. Л., Гераськин, Е. В. (2021). Выявление фальсификации сливочного масла растительными маслами и их роль в метаболизме человека. *Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК — продукты здорового питания*, 2, 51–59. [Bebneva, Y. O., Bezrodny, S. L., Geraskin, E. V. (2021). Detection of falsification of cream oil with vegetable oils and their role in human metabolism. *Technologies of the Food and Processing Industry of the Agro-Industrial Complex-Healthy Food Products,* 2, 51–59. (In Russian)] https://doi.org/10.24412/2311-6447-2021-2-51-59

7. Буркин, К. Е., Мухамметшина, А. Г., Мухарлямова, А. З., Балымова, М. В., Сайфутдинов, А. М., Мохтарова, С. Л. (2025). Исследование образцов сливочного масла низкой ценовой категории на некоторые показатели качества и безопасности. *Ползуновский вестник*, 2, 34–39. [Burkin, K. E., Mukhammetshina, A. G., Mukharlyamova, A. Z., Balymova, M. V., Saifutdinov, A. M., Mokhtarova, S. L. (2025). Study of lowprice butter samples for some quality- and safety indicators. *Polzunovskiy Vestnik*, 2, 34–39. (In Russian)] https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2025.02.005
8. Юрова, Е. А, Кобзева, Т. В., Жижин, Н. А. (2018). Выявление фальсификации жировой фазы молочной продукции. *Контроль качества продукции*, 1, 34–39. [Yurova, E. A., Kobzeva, T. V., Zhizhin, N. A. (2018). Detection of falsification of the fat phase of dairy products. *Production Quality Control*, 1, 34–39. (In Russian)]
9. Афанасьева, А. А., Данилова, Е. С., Пирогова, Е. Н., Павлова, Т. А. (2025). Применение ГХ-методов для выявления фальсификации в продуктах маслоделия. *Сыроделие и маслоделие*, 3, 62–69. [Afanasieva, A. A., Danilova, E. S., Pirogova, E. N., Pavlova, T. A. (2025). Gas chromatography in butter authentication. *Cheese- and Buttermaking,* 3, 62–69. (In Russian)] https://doi.org/10.21603/2073-4018-2025-3-31
10. Юрова, Е. А. (2025). Оценка подлинности молока и молочной продукции согласно ГОСТ Р 72209–2025. *Молочная промышленность*, 5, 2–4. [Yurova, E. A. (2025). Milk and dairy product authenticity assessment according to GOST R 72209–2025. *Dairy Industry,* 5, 2–4. (In Russian)]
11. Mannarino, E., Pirro, M., Cortese, C., Lupattelli, G., Siepi, D., Mezzetti, A. et al. Bertolini S., (2009). Effects of a phytosterol-enriched dairy product on lipids, sterols and 8-isoprostane in hypercholesterolemic patients: A multicenter Italian study. *Nutrition, Metabolism and Cardiovascular Diseases*, 19(2), 84–90. https://doi.org/10.1016/j.numecd.2008.03.012
12. Duong, S., Strobel, N., Buddhadasa, S., Auldist, M. J., Wales, W. J., Moate, P. J. et al. (2018). Modification of the sterol profile in milk through feeding. *Journal of Dairy Science*, 102(7), 5933–5944. https://doi.org/10.3168/jds.2018-15067
13. Sadeghi, N., Rostami, A., Taghavianpour, A., Jafari-Semnani, S., Torabi, P., Pourjabar, Z., Hajimahmoodi, M. (2018). Study on sterol fraction of commercial brands of milk, yoghurt and butter sold in Iranian market and chemometric data analysis. *International Journal of Dairy Technology*, 71(3), 647–653. https://doi.org/10.1111/1471-0307.12511
14. Nagarajappa, V., Battula, S. N., Arora, S., Naik, L. N. (2018). Fortification of milk with phytosterol and its effect on sensory and physicochemical properties. *Irish Journal of Agricultural and Food Research,* 57(1), 63–70. https://doi.org/10.1515/ijafr-2018-0007
15. Verma, A., Meitei, N. S., Gajbhiye, P. U., Raftery, M. J., Ambatipudi, K. (2020). Comparative analysis of milk triglycerides profile between Jaffarabadi buffalo and Holstein Friesian cow. *Metabolites,* 10(12), Article 507. https://doi.org/10.3390/metabo10120507
16. Shehata, A. A. Y., de Man, J. M., Alexander, J. C. (1971). Triglyceride composition of milk fat. i. separation of triglycerides by column and gas-liquid chromatography. *Canadian Institute of Food Technology Journal,* 4(2), 61–67. https://doi.org/10.1016/s0008-3860(71)74171-3
17. Ruiz-Sala, P., Hierro, M. T. G., Martínez-Castro, I., Santa-María, G. (1996). Triglyceride composition of ewe, cow, and goat milk fat. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 73(3), 283–293. https://doi.org/10.1007/bf02523421
18. Molkentin, J., Golay, P.-A., Contarini, G., Johnson, R., MacGibbon, A. (2019). Guidance on the practical application of IDF/ISO standard on the determination of milkfat purity. Bulletin of the International Dairy Federation 499/2019. International Dairy Federation, 2019.
19. Смирнов, А. В. (2022). Выявления фальсификации молочной продукции растительными жирами с использованием метода люминисцентного анализа. *Нормативно-правовое регулирование в ветеринарии,* 4, 134–137. [Smirnov, A. V. (2022). Detection of adulteration of dairy products with vegetable fats using the method of luminescent analysis. *Legal Regulation in Veterinary Medicine*, 4, 134–137. (In Russian)] https://doi.org/10.52419/issn2782-6252.2022.4.134
20. Амелин, В. Г., Шаока, З. А. Ч., Большаков, Д. С., Третьяков, А. В. (2023). Установление фальсификации сливочного масла цветометрическим методом с использованием смартфона и хемометрического анализа. *Известия ВУЗов. Химия и химическая технология,* 66(2), 53–61. [Amelin, V. G., Shogah, Z. A. Ch., Bol'shakov, D. S., Tretyakov, A. V. (2023). Detection of falsification of butter by colorimetric method using smartphone and chemometric analysis. *ChemChemTech*, 66(2), 53–61. (In Russian)] https://doi.org/10.6060/ivkkt.20236602.6717
21. Метелкин, Д. А., Платов, Ю. Т, Рубцов, А. Н. (2020). Идентификация сливочного масла методами ИК-спектроскопии и многомерного анализа. *Пищевая промышленность*, 3, 58–61. [Metlenkin, D. A., Platov, Yu. T., Rubtzov, A. E. (2020). Identification of butter using IR spectroscopy and multivariate analysis. *Food Industry,* 3, 58–61. (In Russian)] https://doi.org/10.24411/0235-2486-2020-10033
22. Nurrulhidayah, A. F., Arieff, S. R., Rohman, A., Amin, I., Shuhaimi, M., Khatib, A. (2015). Detection of butter adulteration with lard using differential scanning calorimetry. *IFRJ*, 22(2), 832–839.
23. Сериков, М. С., Нургалиева, М. Т., Мырзабек, К. А, Тойшиманов, М. Р., Бактыбаева, Ф. К. (2022). К вопросу идентификации состава жировой фазы масложировой продукции. *Техника и технология пищевых производств*, 52(4), 685–693. [Serikov, M. S., Nurgaliyeva, M. T., Myrzabek, A. K., Toishimanov, M. R., Baktybayeva, F. K. (2022). Defining the composition of fat phase in foods. *Food Processing: Techniques and Technology,* 52(4), 685–693. (In Russian)] https://doi.org/10.21603/2074-9414-2022-4-2398
24. Silva, M. G., Lima de Paula, I., Stephani, R., Edwards, H. G. M., Cappa de Oliveira, L. F. (2021). Raman spectroscopy in the quality analysis of dairy products: A literature review. *Journal of Raman Spectroscopy*, 52(12), 2444–2478. https://doi.org/10.1002/jrs.6214
25. Thuku, J. M., Kaniu, M. I., Ndung'u, C. N., Kiruri, L. W., Kaduki, K. A. (2025). Targeted detection of low-level chlorpyrifos residues in milk using chemometrics-aided Raman spectroscopy. *European Journal of Advanced Chemistry Research*, 6(3), 1–12. https://doi.org/10.24018/ejchem.2025.6.3.165
26. Kostovska, R., Cruz, J., Drouin, G., Horan, B., Tobin, J. T., O'Callaghan, T. F. et al. (2025). Use of Raman spectroscopy as a rapid tool to discriminate milk deriving from different pasture-based diets and breeds in a seasonal, spring-calving dairy production system. *Journal of Dairy Science*, 108(9), 9205–9221. https://doi.org/10.3168/jds.2025-26489
27. Santos, A. R., Menezes, D. B., Ellena, J., Andrade, M. B. (2019). Raman spectroscopy application in the characterization of pertaining minerals of a geocollection. *Química Nova,* 42(5), 489–496.
28. Тихонова, В. В., Саушкина, А. С. (2020). Обзор возможностей применения рамановской спектроскопии в процессно-аналитической технологии (PAT). *Вопросы биологической, медицинской и фармацевтической химии,* 23(10), 35–39. [Tihonova, V. V., Saushkina, A. S. (2020). Application of Raman spectroscopy to process analytical technology (PAT). *Problems of Biological, Medical and Pharmaceutical Chemistry*, 23(10), 35–39. (In Russian)] https://doi.org/10.29296/25877313-2020-10-05
29. Silva, M. G., de Paula, I. L., Stephani, R., Edwards, H. G. M., de Oliveira, L. F. C. (2021). Raman spectroscopy in the quality analysis of dairy products: A literature review. *Journal of Raman Spectroscopy*, 52(12), 2444–2478. https://doi.org/10.1002/jrs.6214
30. de Almeida, M. R., de Sá Oliveira, K., Stephani, R., Cappa de Oliveira, L. F. (2012). Application of FT-raman spectroscopy and chemometric analysis for determination of adulteration in milk powder. *Analytical Letters*, 45(17), 2589–2602. https://doi.org/10.1080/00032719.2012.698672
31. Rodrigues Júnior, P. H., de Sá Oliveira, K., de Almeida, C. E. R., de Oliveira, L. F. C., Stephani, R., Pinto M. da S. et al. (2016). FT-Raman and chemometric tools for rapid determination of quality parameters in milk powder: Classification of samples for the presence of lactose and fraud detection by addition of maltodextrin. *Food Chemistry*, 196, 584–588. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.09.055
32. Smith, G. P. S., Gordon, K. C., Holroyd, S. E. (2013). Raman spectroscopic quantification of calcium carbonate in spiked milk powder samples. *Vibrational Spectroscopy*, 67, 87–91. https://doi.org/10.1016/j.vibspec.2013.04.005
33. Kostovska, R., Cruz, J., Drouin, G., Horan, B., Tobin, J. T., O'Callaghan, T. F. et al. (2025). Use of Raman spectroscopy as a rapid tool to discriminate milk deriving from different pasture-based diets and breeds in a seasonal, spring-calving dairy production system. *Journal of Dairy Science*, 108(9), 9205–9221. https://doi.org/10.3168/jds.2025-26489
34. Барковская, И. А., Туровская, С. Н., Илларионова, Е. Е., Ярышев, В. Ю., Блиадзе, В. Г., Кондратенко, В. В. (2025). Сравнение методов ИК- и Раман-спектроскопии для оценки структурных изменений в молоке при тепловой обработке. *FOOD METAENGINEERING*, 3(3), 21–38. [Barkovskaya, I. A., Turovskaya, S. N., Illarionova, E. E., Yaryshev, V. Yu., Bliadze, V. G., Kondratenko, V. V. (2025). Comparison of IR and Raman spectroscopy methods for assessing structural changes in milk during heat treatment. *FOOD METAENGINEERING*, 3(3), 21–38. (In Russian)] https://doi.org/10.37442/fme.2025.3.91
35. Buckova M., Vaskova H., Bubelova, Z. (2016). Raman spectroscopy as a modern tool for lactose determination. *WSEAS Transactions on Biology and Biomedicine,* 13, 108–114.
36. Li, M., Chen, J., Xu, J., Fu, S., Gong, H. (2015). Determination of lactose in milk by Raman spectroscopy. *Analytical Letters*, 48(8), 1333–1340. https://doi.org/10.1080/00032719.2014.979358
37. Lei, F., Zheng, M., Zhang, T., Wang, S., Li., He, D. et al. (2025). Physicochemical analysis of beef tallow and its liquid fraction, comparing frying performance with high oleic acid rapeseed oil and rice bran oil. *Food Chemistry,* 476, Article 143515. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2025.143515
38. Onopiuk, A., Kołodziejczak, K., Szpicer, A., Marcinkowska-Lesiak, M., Wojtasik-Kalinowska, I., Stelmasiak, A. et al. (2022). The effect of partial substitution of beef tallow on selected physicochemical properties, fatty acid profile and PAH content of grilled beef burgers. *Foods*, 11(13), Article 1986. https://doi.org/10.3390/foods11131986
39. O`Brien, R. D. (2008). Fats and oils. Formulating and Processing for Applications. CRC Press, 2008. https://doi.org/10.1201/9781420061673
40. Каламбет, Ю. А., Козьмин, Ю. П., Самохин, А. С. (2017). Фильтрация шумов. Сравнительный анализ методов. *Аналитика*, 5(36), 88–101. [Kalambet, Yu. A., Kozmin. Yu. P., Samokhin. A. S. (2017). Noise filtering. Comparative analysis of methods. *Analytics*, 5(36), 88–101. (In Russian)] https://doi.org/10.22184/2227-572X.2017.36.5.88.101
41. Pchelkina, V., Chernukha, I., Nikitina, M., Ilin, N. (2023). Pig adipose tissue of two different breeds and locations: Morphology and Raman studies. *Foods and Raw Materials*, 11(1), 1–9. https://doi.org/10.21603/2308-4057-2023-1-547
42. Топникова, Е. В., Данилова, Е. С., Заболотин, Г. Ю. (2019). Контроль состава жировой фазы молочных продуктов с целью выявления их фальсификации животными жирами. *Сыроделие и маслоделие*, 1, 10–12. [Topnikova, E. V., Danilova, E. S., Zabolotin, G. Yu. (2019). Control of the fat phase of milk products composition to detect their falsification with animal fats. *Cheese- and Buttermaking*, 1, 10–12. (In Russian)] https://doi.org/10.31515/2073-4018-2019-1-10-12
43. Czamara, K., Majzner, K., Pacia, M. Z., Kochan, K., Kaczor, A., Baranska, M. (2014). Raman spectroscopy of lipids: A review. *Journal of Raman Spectroscopy*, 46(1), 4–20. https://doi.org/10.1002/jrs.4607
44. Saleem, M., Amin, A., Irfan, M. (2021). Raman spectroscopy based characterization of cow, goat and buffalo fats. *Journal of Food Science and Technology*, 58(1), 234–243. https://doi.org/10.1007/s13197-020-04535-x
45. Gallier, S., Gordon, K. C., Jiménez-Flores, R., Everett, D. W. (2011). Composition of bovine milk fat globules by confocal Raman microscopy. *International Dairy Journal*, 21(6), 402–412. https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2011.01.008
46. Gómez-Mascaraque, L. G., Kilcawley, K. N., Hennessy, D., Tobin, J. T., O'Callaghan, T. F. (2020). Raman spectroscopy: A rapid method to assess the effects of pasture feeding on the nutritional quality of butter. *Journal of Dairy Science*, 103(10), 8721–8731. https://doi.org/10.3168/jds.2020-18716
47. Nieuwoudt, M. K., Holroyd, S. E., McGoverin, C. M., Simpson, M. C., Williams, D. E. (2016). Rapid, sensitive, and reproducible screening of liquid milk for adulterants using a portable Raman spectrometer and a simple, optimized sample well. *Journal of Dairy Science*, 99(10), 7821–7831. https://doi.org/10.3168/jds.2016-11100

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ	AUTHOR INFORMATION
Принадлежность к организации	**Affiliation**
Топникова Елена Васильевна — доктор технических наук, заместитель директора по научной работе, Всероссийский научно-исследовательский институт маслоделия и сыроделия 152613, Ярославская область, Углич, Красноармейский бульвар, 19 E-mail: e.topnikova@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0225-6870	**Elena V. Topnikova**, Doctor of Technical Sciences, Deputy Director for Research, All-Russian Scientific Research Institute of Butter- and Cheese-making 19, Krasnoarmeysky Boulevard, Uglich, 152613, Yaroslavl Region, Russia E-mail: e.topnikova@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0225-6870
Пчелкина Виктория Александровна — кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Экспериментальная клиника-лаборатория биологически активных веществ животного происхождения, Федеральный научный центр пищевых систем им. В. М. Горбатова 109316, Москва, ул. Талалихина, 26 E-mail: v.pchelkina@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8923-8661	**Victoria A. Pchelkina**, Candidate of Technical Sciences, Leading Researcher, Experimental Clinic-Laboratory of Biologically Active Substances of Animal Origin, V. M. Gorbatov Federal Research Center for Food Systems 26, Talalikhin str., Moscow, 109316, Russia E-mail: v.pchelkina@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8923-8661
Данилова Екатерина Сергеевна — научный сотрудник, отдел научно-технологических исследований, Всероссийский научно-исследовательский институт маслоделия и сыроделия 152613, Ярославская область, Углич, Красноармейский бульвар, 19 E-mail: e.danilova@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5522-224X * автор для контактов	**Ekaterina S. Danilova**, Researcher, Department of Scientific and Technological Research, All-Russian Scientific Research Institute of Butter- and Cheese-making 19, Krasnoarmeysky Boulevard, Uglich, 152613, Yaroslavl Region, Russia E-mail: e.danilova@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5522-224X * corresponding author
Пирогова Екатерина Николаевна — научный сотрудник, отдел научно-технологических исследований, Всероссийский научно-исследовательский институт маслоделия и сыроделия 152613, Ярославская область, Углич, Красноармейский бульвар, 19 E-mail: e.pirogova@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2732-3059	**Ekaterina N. Pirogova**, Researcher, Department of Scientific and Technological Research, All-Russian Scientific Research Institute of Butter- and Cheese-making 19, Krasnoarmeysky Boulevard, Uglich, 152613, Yaroslavl Region, Russia E-mail: e.pirogova@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2732-3059
Заболотин Григорий Юрьевич — аспирант, Федеральный центр пищевых систем им. В. М. Горбатова 109316, Москва, ул. Талалихина, 26 E-mail: kachestvo.tvoroghome@yandex.ru ORCID: https://orcid.org/0009-0000-9233-446X	**Grigory Yu. Zabolotin**, Graduate Student, Federal Center for Food Systems named after V. M. Gorbatov 26, Talalikhin str., Moscow, 109316, Russia E-mail: kachestvo.tvoroghome@yandex.ru ORCID: https://orcid.org/0009-0000-9233-446X
Критерии авторства	**Contribution**
Авторы в равных долях имеют отношение к написанию рукописи и одинаково несут ответственность за плагиат.	Authors equally relevant to the writing of the manuscript, and equally responsible for plagiarism.
Конфликт интересов	**Conflict of interest**
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.	The authors declare that there is no conflict of interest.

DOI: https://doi.org/10.21323/2618-9771-2026-9-2-228-233

Received 02.02.2026
Accepted in revised 20.05.2026
Accepted for publication 22.05.2026
© Bunde-Tsegba C. M., Iornav M. D., Aondoakaa I. P., Seember J. I., 2026
Available online at https://www.fsjour.com/jour
Original scientific article
Open access

FUNCTIONAL, NUTRITIONAL, AND SENSORY QUALITY OF BREAD PRODUCED FROM WHEAT-CARROT-DATE (*PHOENIX DACTYLIFERA* L.) COMPOSITE FLOURS

Bunde-Tsegba C. M.[1,*], Iornav M. D.[1], Ityotagher P. Aondoakaa[2,*], Seember J. Iorver[1]

[1] Department of Food Science and Technology, Joseph Sarwuan Tarka University, Makurdi, Nigeria
[2] Department of Food Science and Technology, University of Georgia, Athens, Georgia, USA

KEYWORDS:
composite flour, carrot flour, date flour, wheat bread, quality evaluation

ABSTRACT

This study investigated the functional, nutritional, physical, and sensory properties of bread produced from wheat-carrot-date composite flours. Carrot roots and date fruits were processed into flours. Wheat flour was progressively substituted with carrot flour (0–25 %) while date flour was fixed at 10 %, generating four composite flours (80/10/10, 75/15/10, 70/20/10, and 65/25/10 wheat/carrot/date). Wheat flour (100/0/0) was used as a control. Bread samples were produced from each composite flour and the control flour (100 % wheat flour). Analysis of the functional properties of the flours as well as the physical, proximate, and sensory properties of bread samples were performed using standard methods. Results for functional properties of the flours showed decreasing bulk density (0.82–0.65 g/cm^3) and swelling index (7.45–4.45), alongside increasing oil absorption capacity (0.77–1.31 g/g) and water absorption capacity (4.60–6.60 g/g) with higher carrot inclusion. In bread samples, physical properties such as loaf height declined from 10.95 to 3.95 cm, loaf volume from 4.73 to 2.47 cm^3, and specific volume from 1.10 to 0.48 cm^3/g, while loaf weight increased from 231.9 to 241.9 g as carrot flour increased. Proximate analysis of the bread samples indicated rising moisture (21.45–29.95 %), fiber (0.14–0.63 %), and ash (0.15–1.70 %) contents, with concomitant reductions in protein (15.35–8.45 %) and fat (6.76–3.54 %) as the proportion of carrot flour increased. Sensory evaluation revealed that 80/10/10 bread sample achieved the highest overall acceptability (8.60), whereas higher substitution levels significantly reduced preference.

Поступила 02.02.2026
Поступила после рецензирования 20.05.2026
Принята в печать 22.05.2026
© Бунде-Цегба К. М., Йорнав М. Д., Аондоакаа И. Ф., Симбер, Дж. И., 2026
https://www.fsjour.com/jour
Научная статья
Открытый доступ

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ, ПИТАТЕЛЬНЫЕ И ОРГАНОЛЕПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ХЛЕБА ИЗ СМЕШАННОЙ МУКИ ИЗ ПШЕНИЦЫ-МОРКОВИ-ФИНИКОВ (*PHOENIX DACTYLIFERA* L.)

Бунде-Цегба С. М.[1,*], Йорнав М. Д.[1], Аондоакаа И. Ф.[2,*], Симбер, Дж. И.[1]

[1] Кафедра пищевой науки и технологии, Университет Джозефа Сарвуана Тарка, Макурди, Нигерия
[2] Факультет пищевой науки и технологии, Университет Джорджии, Афины, США

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:
смешанная мука, морковная мука, финиковая мука, белый хлеб, оценка качества

АННОТАЦИЯ

В данном исследовании изучали функциональные, пищевые и органолептические свойства хлеба, изготовленного из смешанной муки из пшеницы-моркови-фиников. Корнеплоды моркови и плоды фиников были переработаны в муку. Пшеничную муку заменяли морковной мукой в возрастающем количестве (0–25 %), тогда как количество финиковой муки было зафиксировано на уровне 10 %, что дало четыре рецептуры смешанной муки (пшеница/морковь/финики: 80/10/10, 75/15/10, 70/20/10 и 65/25/10). Пшеничная мука (100/0/0) использовалась в качестве контроля. Были изготовлены образцы хлеба из каждой смешанной муки и контрольной муки (100 % пшеничная мука). Изучали функциональные свойства муки, а также физические свойства, приблизительный химический состав и органолептические свойства образцов хлеба, используя стандартные методы. Результаты анализа функциональных свойств муки показали снижение насыпной плотности (0,82–0,65 г/см^3) и индекса набухания (7,45–4,45), наряду с повышением маслопоглощающей способности (0,77–1,31 г/г) и водопоглощающей способности (4,60–6,60 г/г) при более высоком уровне введения моркови. В образцах хлеба были понижены такие физические свойства как высота буханки с 10,95 до 3,95 см, объем буханки с 4,73 до 2,47 см^3, удельный объем с 1,10 до 0,48 см^3/г, в то время как вес буханки увеличился с 231,9 до 241,9 г при увеличении доли морковной муки. Анализ приблизительного химического состава образцов хлеба показал повышение содержания влаги (21,45–29,95 %), клетчатки (0,14–0,63 %) и золы (0,15–1,70 %) с одновременным снижением белка (15,35–8,45 %) и жира (6,76–3,54 %) по мере увеличения доли морковной муки. При органолептическом анализе образец хлеба 80/10/10 получил наивысшую оценку общей приемлемости (8,60), тогда как более высокие уровни замены существенно снижали предпочтение.

1. Introduction

Bread is one of the most widely consumed baked foods globally and remains a major contributor to daily energy intake across diverse age groups and socio-economic settings. At the same time, consumer expectations around bread are shifting beyond convenience and affordability. Many consumers now look for products that deliver added nutritional value (particularly higher dietary fiber, micronutrients, and naturally occurring bioactive compounds) without sacrificing sensory quality. This has accelerated research interest in composite flour technology and in the use of fruit- and vegetable-derived ingredients to improve the nutritional profile of bakery products, such as bread, while maintaining acceptable loaf characteristics [1]. Composite flour formulations, where

FOR CITATION: **Bunde-Tsegba, C. M, Iornav, M. D, Aondoakaa, I. P., Seember, J. I.** (2026). Functional, nutritional, and sensory quality of bread produced from wheat-carrot-date (*Phoenix dactylifera* L.) composite flours. *Food Systems,* 9(2), 228–233. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2026-9-2-228-233

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: **Бунде-Цегба, К. М., Йорнав, М. Д., Аондоакаа, И. Ф., Симбер, Дж. И.** (2026). Функциональные, питательные и органолептические свойства хлеба из смешанной муки из пшеницы-моркови-фиников (*Phoenix dactylifera* L.). *Пищевые системы*, 9(2), 228–233. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2026-9-2-228-233

wheat is partially substituted with nutrient-dense plant materials, are often positioned as a practical strategy to enhance the micronutrient and fiber content of staple baked foods, and to diversify raw material use in a way that supports local value chains. Beyond nutrition, the functional behavior of composite flour (e.g., water absorption capacity, oil absorption capacity, bulk density, swelling properties) strongly influence dough handling, gas retention, crumb structure, and the final texture of baked products. For this reason, evaluating techno-functional properties is central to explaining why a given flour blend produces a particular loaf volume, crumb softness, or sensory outcome [2–4].

Among potential fortifying ingredients, carrots (*Daucus carota L.*) and dates (*Phoenix dactylifera L.*) are especially attractive because they offer complementary nutritional and functional benefits. Carrots are widely recognized as a rich source of carotenoids (including β-carotene) alongside dietary fiber and a spectrum of phenolic compounds [5,6]. When dried and milled into powder, carrot materials can be incorporated into cereal-based foods as a nutritional enhancer. Recent work on carrot-derived ingredients in baked foods shows consistent improvements in antioxidant potential and mineral contribution, although technological changes (such as reduced loaf expansion or altered crumb structure) may occur at higher substitution levels depending on particle size, fiber content, and water competition during dough development [7]. In bread systems specifically, carrot ingredients have been reported to increase the antioxidant capacity of the final product and enrich the bread matrix with bioactive compounds, but the overall impact on bread quality is highly dependent on the inclusion rate and formulation context. For example, studies incorporating carrot-based powders into wheat bread often report improved nutritional attributes but also note that higher inclusion levels can intensify carrot flavor and influence dough properties [8]. These technological trade-offs are important because they directly shape consumer acceptance. In practical terms, carrot fortification tends to improve the "health story" of bread, but it can also shift crumb color and aroma, and it may reduce specific volume if gluten dilution and fiber-driven water binding are not properly managed [9].

Dates, on the other hand, contribute to a different set of advantages that align well with current clean-label and sugar-reduction trends. Date fruit and date-derived powders/pastes provide natural sweetness along with dietary fiber, minerals, and phenolic antioxidants [10]. Importantly, dates have been increasingly discussed as a natural alternative to refined sweeteners, supporting both nutritional enhancement and sustainability narratives through the valorization of second-grade or surplus dates [11]. Reviews of date-based sweetening strategies highlight their potential for reformulating sweet bakery products while adding micronutrients and antioxidant compounds, although formulation must carefully account for changes in moisture dynamics, browning reactions, and texture. Evidence from recent baked-product research supports the use of date powders as functional ingredients capable of contributing dietary fiber and phenolics while acting as natural sweeteners. For instance, investigations using bisr date powder (an early maturity stage) emphasize that date powders can supply flavonoids and antioxidant compounds and may replace refined sugar in formulations, with measurable effects on the chemical, physical, and sensory properties of the final product [12]. While many of these studies focus on biscuits, the underlying formulation principles (water activity control, fiber-driven texture changes, and flavor impacts) remain relevant when adapting date ingredients to bread systems.

From a product development perspective, combining carrot and date ingredients in wheat bread is conceptually promising because the two materials may complement each other: carrots can enrich bread with carotenoids and fiber while contributing an appealing warm crumb color, whereas dates can provide natural sweetness and additional fiber/minerals that may improve overall palatability. However, bread is a structurally sensitive system, and successful fortification is rarely achieved by "adding more nutrients" alone. Wheat dough performance depends on gluten network formation and gas retention during proofing and baking. Any ingredient that competes for water, dilutes gluten, or introduces coarse insoluble fiber can shift the dough's rheology and reduce loaf expansion, unless the blend level and water management are optimized. This is why measuring flour functional properties alongside bread proximate composition, physical quality indices (loaf weight, loaf volume, specific volume), and sensory attributes are necessary to interpret performance scientifically. Despite growing interest in vegetable- and fruit-based fortification, there remains a practical gap in the literature on wheat bread formulated with combined carrot and date ingredients. Many fortification studies report improved nutrient profiles but do not provide an explanation of how functional properties of the flour blend translate into bread structure and acceptability, which limits usefulness for formulation scale-up. In addition, the optimal inclusion range is often product-specific, meaning that the "best" level is the one that provides meaningful nutritional enhancement while maintaining loaf quality and consumer liking. Therefore, the aim of this study was to evaluate bread produced from wheat–carrot–date composite flours by assessing the functional properties of the flour blends and determining how these properties relate to the proximate composition, physical quality characteristics, and sensory acceptability of the resulting breads.

2. Objects and methods

2.1. Objects

Wheat flour, carrots, dates and other ingredients (baking powder, fat/margarine, yeast and salt) were purchased from Modern market Makurdi, Benue State, Nigeria. Portable water was used throughout the experiment. The processing of materials and the experiments were carried out using the facilities and equipment available at the Department of Food Science and Technology Laboratories, Joseph Sarwuan Tarkaa University Makurdi.

2.2. Preparation of date flour

Date flour was prepared following the method described by [13]. Mature date palm fruits were manually sorted to remove damaged fruits, extraneous materials, and adhering debris. The fruits were thoroughly washed under running tap water and manually de-pitted to separate the seeds from the edible pulp. The de-pitted date flesh was then spread in a single layer on stainless steel trays and dried in a hot-air cabinet dryer UN110 (Memmert GmbH Co. KG, Schwabach, Germany) at 70 °C until a constant weight was achieved. The dried date flesh was milled into a fine flour using hammer mill Retsch ZM 200 (Retsch GmbH, Haan, Germany). The resulting flour was passed through a 250 µm mesh sieve to obtain a uniform particle size and to remove coarse fractions. The sieved date flour was immediately packaged in airtight polyethylene bags and stored at ambient temperature until further use to minimize moisture uptake and oxidative deterioration.

2.3. Preparation of carrot flour

Carrot flour was prepared as previously described in [14]. Fresh carrot roots were manually sorted to remove damaged and diseased samples, washed thoroughly under running tap water to eliminate adhering soil and extraneous materials, and peeled using a stainless-steel knife. The peeled carrots were sliced into uniform thickness (approximately 2 mm) using a vegetable slicer. The carrot slices were blanched in hot water at 95 °C for 5 min in the presence of 0.1 % (w/v) sodium metabisulphite to minimize enzymatic browning and color degradation. After blanching, the slices were rapidly cooled in cold water and drained. The blanched carrot slices were then dried in a hot-air cabinet dryer UN110 (Memmert GmbH Co. KG, Schwabach, Germany) at 60 °C for 12 h until a constant weight was attained. Dried carrot slices were milled into powder using hammer mill Retsch ZM 200 (Retsch GmbH, Haan, Germany). The resulting powder was passed through a 500 µm mesh sieve to obtain a uniform particle size. The sieved carrot flour was packaged in airtight polyethylene bags and stored at ambient temperature until further use.

2.4. Production of bread from wheat-carrot-date composite flours

Four composite flour formulations were prepared by partially substituting wheat flour with carrot flour and date powder at different inclusion levels. The control sample (sample A) consisted of 100 % wheat flour. In sample B, wheat flour was substituted with 10 % carrot flour and 10 % date powder, resulting in a formulation containing 80 % wheat flour. Sample C was formulated with 75 % wheat flour, 15 % carrot flour, and 10 % date powder. Sample D contained 70 % wheat flour, 20 % carrot flour, and 10 % date powder, while sample E was formulated with 65 % wheat flour, 25 % carrot flour, and 10 % date powder. These formulations were designed to evaluate the effects of progressively increasing carrot flour substitution at a constant date powder level on the functional properties of the composite flours and the quality attributes of the resulting breads.

Bread samples were produced from the control and the composite flours, using a straight-dough method described by [15] with slight modification. For each batch, the baking formula consisted of 49.26 % wheat flour or 57. 14 % composite flour, 0.99 % of compressed baker's yeast (*Saccharomyces cerevisiae*), 0.49 % of salt, 3.94 % vegetable shortening, and 37.43 % of potable water. Granulated sugar (7.88 %) was added to the mix containing 100 % wheat flour. The dry ingredients (flour, sugar, and salt) were first combined in a mixing bowl to ensure uniform distribution. Baker's yeast was reconstituted in a small portion of the formulation water and allowed to activate before adding to the flour mixture. Vegetable shortening was then incorporated, followed by addition of the remaining water mixing in a Kenwood mixer ModelA 907 D (Kenwood Limited, England) until a smooth and cohesive dough was formed. The dough was

kneaded by hand to develop structure and allowed to ferment for 90 min at 28 ± 1 °C. After fermentation, the dough was punched down to expel entrapped gas, scaled into 250 g portions, and molded into loaf shapes. The molded dough pieces were proofed for 90 min at 30 °C and 85 % relative humidity. Proofed loaves were baked in a preheated oven Uniscope SM-9053, (Uniscope England) at 250 °C for 30 min. After baking, the loaves were removed from the pans and cooled at room temperature prior to further analyses.

2.5. Analysis of functional properties of wheat-carrot-date composite flour

Packed bulk density (PBD), water absorption capacity (WAC), oil absorption capacity (OAC), and swelling index (SI) of the 100 % wheat flour or composite flour were determined following the procedures described by [16].

2.6. Analysis of bread produced from wheat-carrot-date composite flours

Physical properties such as loaf weight, loaf volume, specific loaf volume, and loaf height were determined as previously described in [15]. Proximate properties including moisture, ash, and crude fiber contents were determined using AOAC 2005 method as described by [17] while protein and fat contents were determined according to the AOAC 2005 method using Kjeldahl and Soxhlet extraction, respectively, as described by [16]. The difference method described in [16] was used to calculate carbohydrate content. The bread samples were randomly coded and served to a panel of 30 assessors comprising students and staff. Panelists evaluated the samples for appearance, aroma, taste, mouthfeel, and overall acceptability using a nine-point hedonic scale, in which a score of 9 represented "like extremely" and a score of 1 represented "dislike extremely" as previously described in [18].

2.7. Statistical analysis

All experiments were performed in triplicate, and the data were presented as the mean ± SD. Statistical analysis of experimental data was performed using the Statistical Package for Social Sciences (SPSS) 27.0. One-way analysis of variance (ANOVA) was conducted to determine significant differences among sample means, followed by Duncan's multiple range test to identify specific differences between means [19]. A significance level of $p < 0.05$ was applied for all statistical comparisons.

3. Results and discussions

3.1. Functional properties of wheat-carrot-date composite flour

The functional properties of the composite flours, presented in Table 1, provide an indication of how each blend is likely to behave during mixing, proofing, and baking. This is because parameters such as bulk density, water absorption, oil absorption, and swelling are closely linked to hydration, dough consistency, and texture development in cereal-based products [3].

Table 1. **Functional properties of wheat-carrot-date composite flour**

Таблица 1. **Функциональные свойства смешанной муки из пшеницы-моркови-фиников**

Sample	Bulk density, g/cm³	OAC, g/g	WAC, g/g	Swell index, %
A (100/0/0)	0.82 ± 0.05^{a}	0.77 ± 0.05^{c}	4.60 ± 0.05^{bc}	7.45 ± 0.05^{b}
B (80/10/10)	0.78 ± 0.05^{ab}	0.86 ± 0.05^{bc}	4.70 ± 0.05^{ab}	6.05 ± 0.05^{d}
C (75/15/10)	0.71 ± 0.05^{bc}	0.87 ± 0.05^{b}	5.40 ± 0.05^{c}	5.75 ± 0.05^{a}
D (70/20/10	0.69 ± 0.05^{c}	1.14 ± 0.05^{a}	5.85 ± 0.05^{a}	5.05 ± 0.05^{c}
E (65/25/10)	0.65 ± 0.05^{c}	1.31 ± 0.05^{bc}	6.60 ± 0.05^{c}	4.45 ± 0.05^{b}

Data are means ± SD (n = 3). Values with different superscripts within the same column are significantly different ($P < 0.05$).
A (100/0/0): 100 % wheat flour, 0 % carrot flour, 0 % date flour; B (80/10/10): 80 % wheat flour, 10 % carrot flour, 10 % date flour; C (75/15/10): 75 % wheat flour, 15 % carrot flour, 10 % date flour; D (70/20/10): 70 % wheat flour, 20 % carrot flour, 10 % date flour; E (65/25/10): 65 % wheat flour, 25 % carrot flour, 10 % date flour; OAC: oil adsorption capacity; WAC: water adsorption capacity.

Bulk density decreased steadily as wheat flour was progressively substituted with carrot flour at a constant date powder level and range from 0.65 g/cm³ in sample E (65/25/10) to 0.82 g/cm³ in sample A (100/0/0). This pattern is consistent with what is commonly observed when higher-fiber, lower-density plant powders are incorporated into wheat flour [20–22]. This is because the blends tend to pack less efficiently due to differences in particle structure, porosity, and compositional makeup. Practically, reduced bulk density can be advantageous from a formulation standpoint because it may improve reconstitution behavior and influence dough handling by changing how quickly the flour hydrates and how the mix develops during kneading [23].

The oil absorption capacity (OAC) ranged from 0.77 g/g in sample A (100/0/0) to 1.31 g/g in sample E (65/25/10). Increased OAC in composite systems is often attributed to greater availability of non-polar binding sites and dietary fiber components, as well as increased surface area/porosity from the added plant ingredient [24]. This is consistent with the increased fiber content observed in this study as wheat flour was progressively substituted with carrot flour at constant date flour level (10 %). From an application perspective, higher OAC is generally desirable in baked products because it supports flavor retention and can contribute to a richer mouthfeel by improving lipid binding within the food matrix [25].

Water absorption capacity (WAC) increased with progressive substitution of wheat flour with carrot flour while date powder was held constant at 10 %. WAC ranged from 4.60 g/g in sample A (100/0/0) to 6.60 g/g in sample E (65/25/10). This upward trend is consistent with the compositional shift introduced by carrot flour, which contributes substantial dietary fiber (cellulose, hemicellulose, and pectin) and therefore increases the density of hydrophilic functional groups available for water binding. In composite flours, fiber-rich ingredients typically raise WAC because they absorb and retain water within a porous matrix, while also increasing the overall hydration requirement of the blend during dough development [26]. In practical terms, this means that higher-carrot formulations are likely to demand more water to reach a comparable mixing consistency, and if the formulation water is not adjusted, the dough appear stiffer and less extensible as observed in this study. From a bread-making perspective, higher WAC can be a double-edged factor: on one hand, greater water uptake may support improved moisture retention and a softer eating quality during short-term storage; on the other hand, excessive water binding by fiber can reduce the amount of "free" water available for gluten development and starch swelling, which may contribute to changes in gas retention and crumb structure if mixing and proofing conditions remain unchanged. The relatively modest magnitude of change in WAC across the blends suggests that the composite system still retained substantial wheat functionality, but the direction of change showed the role of carrot-derived fiber as the primary driver of hydration behavior when date level is constant. Overall, the WAC trend provides a useful functional explanation for any downstream differences observed in dough handling, loaf volume, and crumb softness across the formulations.

Swelling index decreased consistently as carrot flour substitution increased and ranged from 7.45 % in sample A (100/0/0) to 4.45 % in sample E (65/25/10). This trend is expected in wheat–vegetable composite systems because swelling is largely driven by the ability of starch granules (abundant in wheat flour) to hydrate and expand [27]. As wheat flour is progressively replaced with carrot flour, the overall starch fraction of the blend is diluted, leaving less starch available to swell. In addition, carrot flour contributes substantial dietary fiber (cellulose, hemicellulose, and pectin), which competes strongly for water and can physically restrict starch granule expansion by creating a more rigid, water-binding matrix. With date powder held constant at 10 %, soluble sugars and additional fiber are still present across all composite samples and may further compete for water during hydration, reinforcing the reduction in swelling as carrot flour increases. From a product-quality standpoint, a lower swelling index in higher-carrot blends can translate to reduced starch-driven softness and a tighter crumb structure if formulation water and mixing conditions are not adjusted. This higher substitution levels in composite breads require careful optimization to maintain desirable loaf texture and eating quality.

3.2. Physical properties of bread produced from wheat-carrot-date composite flours

The physical quality indices, presented in Table 2, showed a consistent drop in loaf expansion as wheat flour was progressively replaced with carrot flour while the level of date flour was held constant at 10 %. Loaf height dropped markedly from 10.95 cm in sample A (100/0/0) to 3.95 cm in sample E (65/25/10), with bread samples from intermediate blends showing stepwise reductions. A similar pattern was observed for loaf volume and loaf specific volume, which decreased from 4.73 cm³ in sample A (100/0/0) to 2.47 cm³ in sample E (65/25/10) and from 1.10 cm³ in sample A (100/0/0) to 0.48 cm³ in sample E (65/25/10), respectively. These reductions are due to the well-established effect of gluten dilution in composite bread. Replacing wheat flour with non-wheat plant materials reduces the concentration of gluten-forming proteins (gliadin and glutenin), weakens the viscoelastic dough network, and lowers the capacity of the dough to retain fermentation gases during proofing and baking, ultimately limiting oven spring and loaf expansion [28,29]. Beyond gluten dilution, carrot flour introduces dietary fiber, which can further restrict loaf growth by competing for water, increasing dough consistency, and physically interrupting the continuity of the gluten matrix. This fiber-driven interference is widely reported to reduce gas retention

and lead to smaller loaves with tighter structure in fiber-enriched wheat breads [4,30,31]. In the present formulations, the presence of date powder (10 % across samples) may provide fermentable sugars that could support yeast activity; however, the dominant structural limitation appears to be the weakened gas-holding network arising from gluten dilution and fiber interference, which ultimately governs loaf height and loaf volume.

Loaf weight increased slightly but consistently from 231.9 g in sample A (100/0/0) to 241.9 g in sample E (65/25/10). This trend is consistent with composite systems where fiber-rich ingredients increase hydration demand and moisture retention. Carrot flour is expected to raise water binding due to its hydrophilic polysaccharides, and higher water retention during baking can yield heavier loaves even when loaf expansion is reduced [4]. In practical terms, reduced loaf expansion combined with higher retained moisture produces a denser loaf. Overall, the physical-property data suggests that if higher carrot inclusion is desired for nutritional reasons, process/formulation optimization (e.g., water adjustment, mixing energy, dough improvers, or hydrocolloids) would likely be required to recover loaf structure and maintain consumer-acceptable bread quality.

Table 2. **Physical properties of bread produced from wheat-carrot-date composite flours**

Таблица 2. **Физические свойства хлеба, изготовленного из смешанной муки из пшеницы-моркови-фиников**

Sample	Loaf height, cm	Loaf volume, cm^3	Loaf weight, g	Specific volume, cm^3/g
A (100/0/0)	10.95 ± 0.05^a	4.73 ± 0.05^a	231.9 ± 0.05^e	1.1 ± 0.05^a
B (80/10/10)	5.45 ± 0.05^b	4.57 ± 0.05^b	238.9 ± 0.05^d	1.07 ± 0.05^a
C (75/15/10)	4.95 ± 0.05^c	3.41 ± 0.05^c	239.9 ± 0.05^c	0.78 ± 0.05^b
D (70/20/10	4.45 ± 0.05^d	2.52 ± 0.05^d	240.9 ± 0.05^b	0.56 ± 0.05^c
E (65/25/10)	3.95 ± 0.05^e	2.47 ± 0.05^d	241.9 ± 0.05^a	0.48 ± 0.05^c

Data are means ± SD (n = 3). Values with different superscripts within the same column are significantly different ($P < 0.05$).
A (100/0/0): 100 % wheat flour, 0 % carrot flour, 0 % date flour; B (80/10/10): 80 % wheat flour, 10 % carrot flour, 10 % date flour; C (75/15/10): 75 % wheat flour, 15 % carrot flour, 10 % date flour; D (70/20/10): 70 % wheat flour, 20 % carrot flour, 10 % date flour; E (65/25/10): 65 % wheat flour, 25 % carrot flour, 10 % date flour.

3.3. Proximate composition of bread produced from wheat-carrot-date composite flours

The proximate composition of breads produced from wheat flour partially substituted with carrot flour (at a fixed 10 % date powder level) is presented in Table 3. The moisture content of food gives an indication of its stability and keeping quality [32,33]. Moisture increased progressively from 21.45 % in sample A (100/0/0) to 29.95 % in sample E (65/25/10), indicating that carrot-rich blends retained more water in the baked loaf. This trend is expected because fiber-rich plant materials increase the hydration demand of dough and promote water retention within the crumb matrix, thereby limiting moisture loss during baking as explained earlier. Similar interpretations have been reported in bread enrichment studies, where final bread moisture is closely linked to the amount of water absorbed during mixing and the water-holding behavior of the formulation [3,31].

Protein content decreased steadily from 15.35 % in sample A (100/0/0) to 8.45 % in sample E (65/25/10). Mechanistically, this reflects a dilution effect: wheat flour contributes the bulk of the protein in standard bread systems, whereas carrot-derived ingredients contain much lower protein levels than wheat and therefore reduce total protein concentration as substitution increases. In addition, the upward shift in moisture can further reduce the apparent protein percentage per 100 g bread. This pattern (declining protein with progressive replacement of wheat by low-protein plant materials) has also been observed in wheat-based blends enriched with carrot pomace and other fruit/vegetable fractions [7].

Like protein, fat content decreased from 6.76 % in sample A (100/0/0) to 3.54 % in sample E (65/25/10). In composite breads where the shortening/fat added during mixing is held constant as is the case in this study, the measured fat per 100 g bread may still decline when moisture increases and the loaf becomes denser, because proximate values are expressed on a wet basis. A second contributor is ingredient dilution: carrot- and date-derived flours typically do not contribute much lipid relative to wheat-based systems, so increasing substitution tends to reduce the overall lipid fraction attributed to the flour component. Patterns consistent with "substitution-driven" shifts in fat have been documented in wheat flour blends fortified with carrot pomace [7].

As expected, crude fiber increased markedly with carrot inclusion, rising from 0.14 % in sample A (100/0/0) to 0.63 % in sample E (65/25/10). This reflects the inherently higher dietary fiber content of carrot materials (cellulose/hemicellulose/pectic polysaccharides) and demonstrates that the composite approach achieved nutritional improvement in fiber content compared with the all-wheat control. Similar outcomes (fiber enrichment as wheat is substituted with fruit/vegetable fractions) are widely reported in composite flour studies using carrot-derived ingredients [7].

Ash content increased from 0.15 % in sample A (100/0/0) to 1.70 % in sample E (65/25/10), indicating increased total mineral contribution with progressive substitution. This is consistent with the fact that many plant and fruit materials contribute higher mineral residues than refined wheat flour, and these minerals are retained through baking because they are not destroyed by heat. Composite bread studies incorporating non-wheat plant ingredients similarly report increases in ash with substitution [34,35]. Carbohydrate (CHO) values remained comparatively stable (54.78–56.15 %) across treatments.

3.4. Sensory properties of bread produced from wheat-carrot-date composite flour

Overall, at low carrot flour substitution, sample B (80/10/10) produced the most preferred bread, while higher carrot levels resulted in a progressive decline in sensory quality (Table 4). Appearance scores were high for sample A (100/0/0), the control, which scored 8.46, and sample B (80/10/10), which scored 8.53, but declined sharply with increasing carrot flour, reaching 4.26 in sample E (65/25/10). At low inclusion levels,

Table 3. **Proximate composition of bread produced from wheat-carrot-date composite flour**

Таблица 3. **Приблизительный химический состав хлеба, изготовленного из смешанной муки из пшеницы-моркови-фиников**

Sample	Protein, %	Moisture, %	Fat, %	Fiber, %	Ash, %	CHO, %
A (100/0/0)	15.35 ± 0.05^a	21.45 ± 0.01^d	6.76 ± 0.03^a	0.14 ± 0.05^b	0.15 ± 0.05^d	56.15 ± 0.05^a
B (80/10/10)	13.95 ± 0.05^b	24.95 ± 0.01^c	5.05 ± 0.02^b	0.17 ± 0.03^b	0.99 ± 0.05^c	54.89 ± 0.01^c
C (75/15/10)	11.35 ± 0.05^c	26.45 ± 0.02^b	4.80 ± 0.01^b	0.18 ± 0.03^b	1.11 ± 0.02^b	56.11 ± 0.05^a
D (70/20/10	10.05 ± 0.05^c	29.25 ± 0.01^a	4.01 ± 0.01^c	0.60 ± 0.05^a	1.31 ± 0.03^b	54.78 ± 0.02^c
E (65/25/10)	8.45 ± 0.05^d	29.95 ± 0.04^a	3.54 ± 0.02^d	0.63 ± 0.05^a	1.70 ± 0.04^a	55.73 ± 0.05^b

Data are means ± SD (n = 3). Values with different superscripts within the same column are significantly different ($P < 0.05$).
A (100/0/0): 100 % wheat flour, 0 % carrot flour, 0 % date flour; B (80/10/10): 80 % wheat flour, 10 % carrot flour, 10 % date flour; C (75/15/10): 75 % wheat flour, 15 % carrot flour, 10 % date flour; D (70/20/10): 70 % wheat flour, 20 % carrot flour, 10 % date flour; E (65/25/10): 65 % wheat flour, 25 % carrot flour, 10 % date flour; CHO: carbohydrate.

Table 4. **Sensory properties of bread produced from wheat-carrot-date composite flour**

Таблица 4. **Органолептические свойства хлеба, изготовленного из смешанной муки из пшеницы-моркови-фиников**

Sample	Appearance	Taste	Aroma	Mouthfeel	Overall acceptability
A (100/0/0)	8.46 ± 1.74^a	8.26 ± 2.70^a	8.46 ± 2.51^a	8.13 ± 1.83^a	8.53 ± 1.51^a
B (80/10/10)	8.53 ± 1.64^a	8.73 ± 1.45^a	8.53 ± 1.64^a	8.00 ± 1.64^a	8.60 ± 1.50^a
C (75/15/10)	7.93 ± 1.96^b	8.00 ± 2.00^b	8.33 ± 3.61^b	7.40 ± 2.91^b	7.13 ± 1.74^b
D (70/20/10	6.86 ± 1.91^c	7.66 ± 2.04^b	6.93 ± 1.96^b	6.93 ± 1.10^b	5.00 ± 1.00^c
E (65/25/10)	4.26 ± 1.96^d	6.40 ± 1.29^c	5.13 ± 1.50^c	5.60 ± 1.24^c	5.73 ± 1.96^c

Data are means ± SD (n = 30). Values with different superscripts within the same column are significantly different ($P < 0.05$).
A (100/0/0): 100 % wheat flour, 0 % carrot flour, 0 % date flour; B (80/10/10): 80 % wheat flour, 10 % carrot flour, 10 % date flour; C (75/15/10): 75 % wheat flour, 15 % carrot flour, 10 % date flour; D (70/20/10): 70 % wheat flour, 20 % carrot flour, 10 % date flour; E (65/25/10): 65 % wheat flour, 25 % carrot flour, 10 % date flour

carrot flour imparted an attractive orange-brown color that enhanced visual appeal. However, at higher substitution levels, reduced loaf height and volume produced a darker, denser crumb that negatively affected appearance. Taste improved slightly at low–moderate carrot levels, with sample B (80/10/10) recording the highest score of 8.73 followed by the control sample A (100/0/0) with a score of 8.26. This reflects the combined effect of natural sweetness from date powder and mild flavor contributions from carrot flour. At higher carrot levels, taste scores declined to 6.40 in sample E (65/25/10), likely due to increased fiber content, which can produce a heavier palate and slight off-flavors in composite breads. Aroma followed a similar trend: samples A (100/0/0) to sample C (75/15/10)) maintained high scores (8.33–8.53), while samples D (70/20/10) and E (65/25/10) showed notable declines with scores of 6.93 and 5.13, respectively. Improved aroma at low substitution may be linked to enhanced Maillard reactions from date sugars and pleasant carrot-derived volatiles. In contrast, weaker gluten structure and denser crumb at higher carrot levels likely limited aroma release. Mouthfeel decreased steadily with increasing carrot flour, dropping from 8.13 in the control to 5.60 in sample E (65/25/10). This reflects gluten dilution and fiber-induced disruption of the dough matrix, which produces a tighter crumb, increased firmness, and reduced elasticity. Overall acceptability score was highest for sample B (80/10/10) (8.60) and declined substantially at higher carrot levels with sample D (70/20/10) and sample E (65/25/10) scoring 5.00 and 5.73, respectively. Collectively, the results showed an optimal enrichment window around 10% carrot flour (with 10% date fixed), where sensory quality is maintained or slightly improved. Beyond this level, texture deterioration and visual darkening dominate consumer perception and drive a marked reduction in acceptability.

4. Conclusion

This study showed that substituting wheat flour with carrot flour (while keeping date powder constant at 10%) measurably changed the techno-functional behavior of the composite flours and, in turn, the quality of the breads produced. Across the formulations (100/0/0 to 65/25/10 wheat/carrot/date), bulk density decreased as carrot flour increased, indicating looser packing of the composite flours, while oil absorption capacity increased, suggesting improved oil-binding potential as more carrot material was incorporated. Water absorption capacity varied only slightly but tended to be higher at the higher-carrot blends, implying greater hydration demand during mixing. Swelling index values also changed across blends. In the baked breads, progressive wheat replacement with carrot flour produced a clear reduction in loaf expansion. Loaf height, loaf volume, and specific volume decreased markedly as carrot flour increased. At the same time, loaf weight increased slightly, which is likely related to higher moisture retention and denser crumb formation in the fiber-enriched breads. Nutritionally, increasing carrot flour generally shifted the bread composition toward higher moisture, fiber, and ash contents, indicating improved water retention and mineral contribution, while key macronutrients changed across formulations. Overall, the proximate results showed that carrot — date enrichment can enhance selected nutritional attributes (notably fiber / ash), but these gains occur alongside quality trade-offs linked to structure and moisture management in the finished loaves. Sensory evaluation supported these trade-offs clearly. Breads produced with low carrot substitution maintained high scores, and the 80/10/10 formulation (sample B) recorded the best overall acceptability. However, higher carrot substitution levels (⩾20–25%) led to notable reductions in consumer ratings, especially for mouthfeel and overall acceptability, consistent with the denser structure and lower loaf expansion observed instrumentally. Taken together, the results suggest an optimal enrichment "window" around 10% carrot flour with 10% date powder (Sample B), where sensory quality is preserved (or slightly improved) while still delivering compositional benefits. If higher carrot inclusion is desired for stronger nutritional positioning, formulation and process adjustments (particularly water optimization and structure-support strategies) will be necessary to recover loaf volume and maintain acceptable texture.

REFERENCES

1. Jenfa, M. D., Adelusi, O. A., Aderinoye, A., Coker, O. J., Martins, I. E. et al. (2024). Physicochemical compositions, nutritional and functional properties, and color qualities of sorghum — orange-fleshed sweet potato composite flour. *Food Science and Nutrition*, 12(4), 2364–2378. https://doi.org/10.1002/fsn3.3922
2. Ramashia, S. E., Ntsanwisi, M. D., Onipe, O. O., Mashau, M. E., Olamiti, G. (2024). Nutritional, functional, and microbial quality of wheat biscuits enriched with malted pearl millet and orange peel flours. *Food Science and Nutrition*, 12(12), 10477–10493. https://doi.org/10.1002/fsn3.4562
3. Menon, L., Majumdar, S. D., Ravi, U. (2015). Development and analysis of composite flour bread. *Journal of Food Science and Technology*, 52(7), 4156–4165. https://doi.org/10.1007/s13197-014-1466-8
4. Verbeke, C., Debonne, E., Versele, S., Van Bockstaele, F., Eeckhout, M. (2024). Technological evaluation of fiber effects in wheat-based dough and bread. *Foods*, 13(16), Article 2582. https://doi.org/10.3390/foods13162582
5. Ahmad, T., Cawood, M., Iqbal, Q., Ariño, A., Batool, A., Tariq, R. M. S. et al. (2019). Phytochemicals in Daucus carota and their health benefits — Review article. *Foods*, 8(9), Article 424. https://doi.org/10.3390/foods8090424
6. Sharma, K. D., Karki, S., Thakur, N. S., Attri, S. (2012). Chemical composition, functional properties and processing of carrot — A review. *Journal of Food Science and Technology*, 49(1), 22–32. https://doi.org/10.1007/s13197-011-0310-7
7. Ahmad, M., Wani, T. A., Wani, S.M., Masoodi, F.A., Gani, A. (2016). Incorporation of carrot pomace powder in wheat flour: Effect on flour, dough and cookie characteristics. *Journal of Food Science and Technology*, 53(10), 3715–3724. https://doi.org/10.1007/s13197-016-2345-2
8. Pandey, P., Grover, K., Dhillon, T. S., Chawla, N., Kaur, A. (2024). Development and quality evaluation of polyphenols enriched black carrot (Daucus carota L.) powder incorporated bread. *Heliyon*, 10(3), Article e25109. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25109
9. Ziobro, R., Ivanišová, E., Bojňanská, T., Gumul, D. (2022). Retention of antioxidants from dried carrot pomace in wheat bread. *Applied Sciences*, 12(19), Article 9735. https://doi.org/10.3390/app12199735
10. Al-Shwyeh, H. A. (2019). Date palm (*Phoenix dactylifera* L.) fruit as potential antioxidant and antimicrobial agents. *Journal of Pharmacy and Bioallied Sciences*, 11(1), 1–11. https://doi.org/10.4103/jpbs.JPBS_168_18
11. Sayas-Barberá, E., Paredes, C., Salgado-Ramos, M., Pallarés, N., Ferrer, E., Navarro-Rodríguez de Vera, C. et al. (2023). Approaches to enhance sugar content in foods: is the date palm fruit a natural alternative to sweeteners? *Foods*, 13(1), Article 129. https://doi.org/10.3390/foods13010129
12. Elkatry, H. O., Almubarak, S. E. H., Mohamed, H. I., Ramadan, K. M. A., Ahmed, A. R. (2024). The potential of using Bisr date powder as a novel ingredient in biscuits made of wheat flour only or mixed with barley. *Foods*, 13(12), Article 1940. https://doi.org/10.3390/foods13121940
13. Assous, M. T. M., Kenawi, M. A., El Sokkary, F. A. H., Kenawi, M. N., Abd el Galil, Z. A. H. (2021). Production and evaluation of date powder. *International Journal of Family Studies, Food Science and Nutrition Health*, 2(1), 19–39.
14. Phebean, I. O., Akinyele, O., Toyin, A., Folasade, O., Olabisi, A., Nnenna, E. (2017). Development and quality evaluation of carrot powder and cowpea flour enriched biscuits. *International Journal of Food Science and Biotechnology*, 2(2), 67–72.
15. Yusufu, M.I., Ejeh, D.D. (2018). Production of bambara groundnut substituted whole wheat bread: Functional properties and quality characteristics. *Journal of Nutrition*, 8(5), Article 1000731. https://doi.org/10.4172/2155–9600.1000731
16. Aondoakaa, I. P., Arueya, G. L. (2026). Physicochemical, functional, and pasting properties of pre-gelatinized fermented *Digitaria exilis* starch enriched with freeze-dried *Clerodendrum volubile* leaf extract. *Applied Food Research*, 6(1), Article 101718. https://doi.org/10.1016/j.afres.2026.101718
17. Amove, J., Ogori, A, F., Aondoakaa, I. P. (2019). Effect of yoghurt-milk enrichment with whole soy bean flour. *Journal of Nutritional Health and Food Engineering*, 9(3), 97–103.
18. Aondoakaa, I. P., Terhile, C. (2020). Production and quality evaluation of margarine from blends of melon and palm kernel oils. *World Journal of Food Science and Technology*, 4(3), 72–79. https://doi.org/10.11648/j.wjfst.20200403.12
19. Aondoakaa, I. P., Arueya, G. L. (2024). Antihyperglycemic potential of fermented *Digitaria exilis* polysaccharide partially substituted with *Clendendrum volubile* leaf extract. *Food Chemistry Advances*, 5, Article 100844. https://doi.org/10.1016/j.focha.2024.100844
20. Ocheme, O. B., Adedeji, O. E., Chinma, C. E., Yakubu, C. M., Ajibo, U. H. (2018). Proximate composition, functional, and pasting properties of wheat and groundnut protein concentrate flour blends. *Food Science and Nutrition*, 6(5), 1173–1178. https://doi.org/10.1002/fsn3.670
21. Melese, A. D., Keyata, E. O. (2022). Effects of blending ratios and baking temperature on physicochemical properties and sensory acceptability of biscuits prepared from pumpkin, common bean, and wheat composite flour. *Heliyon*, 8(10), Article e10848. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e10848
22. Okoyeuzu, C. F., Okoronkwo, C. N., Eze, C. R., Otuonye, C. V., Hassani, M. I., Nduka, O. C. et al. (2023). Quality attributes of date and wheat flour pineapple juice blended cookies as affected by different baking temperatures. *PeerJ*, 11, Article e14876. https://doi.org/10.7717/peerj.14876
23. Coțovanu, I., Mironeasa, S. (2021). Impact of different amaranth particle sizes addition level on wheat flour dough rheology and bread features. *Foods*, 10(7), Article 1539. https://doi.org/10.3390/foods10071539
24. Awolu, O. O., Osemeke, R. O., Ifesan, B. O. T. (2016). Antioxidant, functional and rheological properties of optimized composite flour, consisting wheat and amaranth seed, brewers' spent grain and apple pomace. *Journal of Food Science and Technology*, 53(2), 1151–1163. https://doi.org/10.1007/s13197-015-2121-8
25. Wang, N., Maximiuk, L., Fenn, D., Nickerson, M. T., Hou, A. (2020). Development of a method for determining oil absorption capacity in pulse flours and protein materials. *Cereal Chemistry*, 97(6), 1111–1117. https://doi.org/10.1002/cche.10339
26. Hasmadi, M., Noorfarahzilah, M., Noraidah, H., Zainol, M. K., Jahurul, M. H.A. (2020). Functional properties of composite flour: A review. *Food Research*, 4(6), 1820–1831. https://doi.org/10.26656/fr.2017.4
27. Kumar, R., Khatkar, B. S. (2017). Thermal, pasting and morphological properties of starch granules of wheat (*Triticum aestivum* L.) varieties. *Journal of Food Science and Technology*, 54(8), 2403–2410. https://doi.org/10.1007/s13197-017-2681-x
28. Sivam, A. S., Sun-Waterhouse, D., Quek, S., Perera, C. O. (2010). Properties of bread dough with added fiber polysaccharides and phenolic antioxidants: A review. *Journal of Food Science*, 75(8), R163-R174. https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2010.01815.x

29. Chikpah, S. K., Korese, J. K., Hensel, O., Sturm, B., Pawelzik, E. (2023). Influence of blend proportion and baking conditions on the quality attributes of wheat, orange-fleshed sweet potato and pumpkin composite flour dough and bread: Optimization of processing factors. *Discover Food*, 3(1), Article 2. https://doi.org/10.1007/s44187-023-00041-z
30. Cacak-Pietrzak, G., Grabarczyk, J., Szafrańska, A., Krajewska, A., Dziki, D. (2024). Cereal coffee as a functional additive in wheat bread: Impact on dough and bread properties. *Foods*, 13(24), Article 3991. https://doi.org/10.3390/foods13243991
31. Makokha, M. P., Muliro, P. S., Ngoda, P. N., Ghemoh, C. J., Subramanian, S., Xavier, C. et al. (2023). Unravelling the nutritional and health benefits of wheat bread enriched with meat powder from laying hen fed diet with insect (*Hermetia illucens*) meal. *Heliyon*, 9(10), Article e20506. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e20506
32. Aondoakaa, I. P., Julius, A. (2020). Physiochemical composition, sensory properties and keeping quality of functional yoghurt produced from milk-soy flour blends. *Journal of Nutritional Health and Food Engineering*, 10(1), 5–12.
33. Aondoakaa, I. P., Yua, T., Iorver, J. S. (2022). Proximate composition and sensory properties of fermented sorghum and fullfat soy flour blends for “ogi” production. *African Journal of Food Science and Technology*, 13(9), 1–4.
34. Ameur, H., Cantatore, V., Filannino, P., Cavoski, I., Nikoloudaki, O., Gobbetti, M. et al. (2022). Date seeds flour used as value-added ingredient for wheat sourdough bread: An example of sustainable bio-recycling. *Frontiers in Microbiology*, 13, Article 873432. https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.873432
35. Aljahani, A. H. (2022). Wheat-yellow pumpkin composite flour: Physico-functional, rheological, antioxidant potential and quality properties of pan and flat bread. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 29(5), 3432–3439. https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2022.02.040

AUTHOR INFORMATION	СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ
Affiliation	**Принадлежность к организации**
Bunde-Tsegba C. M., Lecturer, Department of Food Science and Technology, College of Food Technology and Human Ecology, Joseph Sarwuan Tarka University Makurdi P. M.B 2373, Nigeria E-mail: bundecomfort@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5798-9396 * corresponding author	**Бунде-Цегба К. М.** — Преподаватель, кафедра пищевых наук и технологий, Колледж пищевых технологий и экологии человека, Университет Джозефа Сарвуана Тарка Макурди, П.М.Б., 2373, Нигерия E-mail: bundecomfort@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5798-9396 * автор для контактов
Iornav M. D., Student, Department of Food Science and Technology, College of Food Technology and Human Ecology, Joseph Sarwuan Tarka University Makurdi P. M.B 2373, Nigeria E-mail: iornavmsughter@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0009-0002-6802-0844	**Йорнав М. Д.** — студент, кафедра пищевых наук и технологий, Колледж пищевых технологий и экологии человека, Университет Джозефа Сарвуана Тарка Макурди, П.М.Б., 2373, Нигерия E-mail: iornavem@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0009-0002-6802-0844
Ityotagher P. Aondoakaa, Graduate Research Assistant, Department of Food Science and Technology, College of Agricultural and Environmental Sciences, University of Georgia 100 Cedar St., Athens, GA 30602–2610, USA E-mail: Ityotagher.Aondoakaa@uga.edu ORCID: https://orcid.org/0009-0004-8044-8581 * corresponding author	**Аондоакаа, И. П.** — ассистент-исследователь, факультет пищевых наук и технологий, Колледж сельскохозяйственных наук и наук об окружающей среде, Университет Джорджии Сидар-стрит, 100, Афины, Джорджия, 30602–2610, США E-mail: Ityotagher.Aondoakaa@uga.edu ORCID: https://orcid.org/0009-0004-8044-8581 * автор для контактов
Seember J. Iorver, Graduate Student, Department of Food Science and Technology, College of Food Technology and Human Ecology, Joseph Sarwuan Tarka University Makurdi P. M.B 2373, Nigeria E-mail: hycinthajacintha@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0009-0004-0349-8091	**Симбер Дж. И.** — аспирант, кафедра пищевых наук и технологий, Колледж пищевых технологий и экологии человека, Университет Джозефа Сарвуана Тарка Макурди, П.М.Б., 2373, Нигерия E-mail: hycinthajacintha@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0009-0004-0349-8091
Contribution	**Критерии авторства**
Bunde-Tsegba C. M.: conceptualization, supervision, project administration, resources, data curation, formal analysis, investigation, methodology, visualization, writing-original draft. **Iornav M. D.**: conceptualization, resources, data curation, formal analysis, investigation, methodology, visualization, writing-original draft. **Aondoakaa I. P.**: formal analysis, data curation, methodology, writing-review and editing. **Seember J. I.**: data curation, formal analysis, investigation, methodology, visualization, writin-original draft. Authors equally relevant to the writing of the manuscript, and equally responsible for plagiarism	**Бунде-Цегба К. М.**: разработка концепции, надзор, администрирование проекта, ресурсы, обработка данных, формальный анализ, исследование, методология, визуализация, написание оригинального проекта. **Йорнав М. Д.**: концептуализация, ресурсы, обработка данных, формальный анализ, исследование, методология, визуализация, написание-первоначальный вариант. **Аондоакаа И. Ф.**: формальный анализ, обработка данных, методология, написание-обзор и редактирование. **Симбер Дж. И.**: обработка данных, формальный анализ, исследование, методология, визуализация, написание оригинального проекта. Авторы, имеющие одинаковое отношение к написанию рукописи.
Conflict of interest	**Конфликт интересов**
The authors declare no conflict of interest.	Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

DOI: https://doi.org/10.21323/2618-9771-2026-9-2-234-240

Поступила 10.12.2025
Поступила после рецензирования 20.05.2026
Принята в печать 22.05.2026
© Серба Е. М., Крючкова Е. Р., Юраскина Т. В., Римарева Л. В., Гаврилова Д. А., Борщева Ю. А., Оверченко М. Б., 2026

https://www.fsjour.com/jour
Научная статья
Открытый доступ

ПОДБОР РАСЫ ДРОЖЖЕЙ ДЛЯ СБРАЖИВАНИЯ ПШЕНИЧНО-ЧЕРНОСМОРОДИНОВОГО СУСЛА В ТЕХНОЛОГИЯХ ЗЕРНО-ФРУКТОВЫХ ДИСТИЛЛЯТОВ

Серба Е. М., Крючкова Е. Р., Юраскина Т. В.*, Римарева Л. В., Гаврилова Д. А., Борщева Ю. А., Оверченко М. Б.

Всероссийский научно-исследовательский институт пищевой биотехнологии — филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра питания, биотехнологии и безопасности пищи, Москва, Россия

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *пшенично-черносмородиновые сусло и бражки, расы дрожжей, брожение, этанол, метаболиты*

АННОТАЦИЯ

Результаты последних исследований выявили перспективность введения жмыха черной смородины в технологию зерно-фруктовых дистиллятов. Однако вопросам подбора дрожжей, обеспечивающих эффективное сбраживание и формирование качественных характеристик напитков, практически не уделялось внимания. Цель работы — отбор штамма дрожжей *Saccharomyces cerevisiae*, обладающего высокой бродильной активностью и способностью к синтезу ароматообразующих метаболитов при сбраживании пшенично-черносмородинового сусла. Объектами исследования служили расы спиртовых (985-Т и 1054) и винных дрожжей («Москва 30» и «Черносмородиновая»). Показано, что использование спиртовых рас дрожжей привело к более интенсивному сбраживанию сусла: к 18 ч содержание углеводов снизилось более чем в 7 раз, в образцах с винными дрожжами — в 4 раза. Установлено, что наибольшую бродильную активность по количеству выделившегося CO_2 (12,3 г) и концентрации этанола (10,5–10,6 % об.) проявила раса спиртовых дрожжей 985-Т. Способ приготовления зерно-фруктового сусла не оказывал значимого влияния на эффективность спиртового брожения. Установлено, что состав побочных продуктов брожения в основном зависел от расы дрожжей: концентрация высших спиртов в образцах бражек с расами дрожжей 985-Т и 1054 была более чем на 30 % ниже; доля ароматообразующих соединений от их общего количества — выше (22,9–28,9 %); у винных рас этот показатель составил 16,8–18,9 %. Обоснован выбор дрожжей 985-Т в результате получения более высоких качественных показателей пшенично-черносмородиновых бражек: увеличение выхода спирта на 3,7–4,7 %, повышенное содержание ароматообразующих метаболитов (26,7–28,9 %), пониженные концентрации высших спиртов (440,9–480,9 мг/дм^3) и метанола (79,0–84,0 мг/дм^3). Для совершенствования технологий зерно-фруктовых дистиллятов перспективны дальнейшие исследования процессов трансформации ароматообразующих соединений сырья на разных технологических этапах его переработки: в процессе ферментации при приготовлении сусла, в результате метаболических превращений под действием ферментов дрожжей и при дистилляции.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Работа проведена за счет средств субсидии на выполнение государственного задания (тема № FGMF-2026-0017).

Received 10.12.2025
Accepted in revised 20.05.2026
Accepted for publication 22.05.2026
© Serba E. M., Kryuchkova E. R., Yuraskina T. V., Rimareva L. V., Gavrilova D. A., Borshcheva Yu. A., Overchenko M. B., 2026

Available online at https://www.fsjour.com/jour
Original scientific article
Open access

SELECTION OF YEAST STRAIN FOR FERMENTATION OF WHEAT-BLACKCURRANT WORT IN GRAIN-FRUIT DISTILLATE TECHNOLOGIES

Elena M. Serba, Elizaveta R. Kryuchkova, Tatyana V. Yuraskina*, Liubov V. Rimareva, Daria A. Gavrilova, Yulia A. Borshcheva, Marina B. Overchenko

All-Russian Scientific Research Institute of Food Biotechnology is a branch of the Federal State Budgetary Institution "Federal Research Centre of Nutrition, Biotechnology and Food Safety", Moscow, Russia

KEYWORDS: *wheat-blackcurrant wort and wash, yeast strains, fermentation, ethanol, metabolites*

ABSTRACT

The results of recent studies showed the prospects of introducing black currant pomace into the technology of grain-fruit distillates. However, practically no attention was paid to selection of yeasts that ensure effective fermentation and formation of the beverage quality characteristics. The aim of this study was a selection of *Saccharomyces cerevisiae* yeast strain with high fermentation activity and ability to synthesize aroma-producing metabolites during the fermentation of wheat-blackcurrant wort. The objects of the study were alcohol (985-T and 1054) and wine (Moskva 30 and Chernosmorodinovaya) yeasts strains. It was shown that the use of alcohol yeast strains resulted in more intensive wort fermentation: by 18 h, the carbohydrate content decreased more than 7 times, while in samples containing wine yeast, it decreased 4 times. It was found that the highest fermentation activity in terms of the amount of released CO_2 (12.3 g) and ethanol concentration (10.5–10.6 % vol.) was demonstrated by the 985-T alcohol yeast strain. The method of grain-fruit wort preparation did not exert a significant effect on alcoholic fermentation efficiency. It was established that the composition of fermentation metabolites mainly depended on the yeast strain. The concentration of higher alcohols in wash samples with the 985-T and 1054 yeast strains was lower by more than 30 %, and the proportion of aroma-producing compounds was higher and amounted to 22.9…28.9 % of the total

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: **Серба, Е. М., Крючкова, Е. Р., Юраскина, Т. В., Римарева, Л. В., Гаврилова, Д. А., Борщева, Ю. А. и др.** (2026). Подбор расы дрожжей для сбраживания пшенично-черносмородинового сусла в технологиях зерно-фруктовых дистиллятов. *Пищевые системы*, 9(2), 234–240. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2026-9-2-234-240

FOR CITATION: **Serba, E. M., Kryuchkova, E. R., Yuraskina, T. V., Rimareva, L. V., Gavrilova, D. A., Borshcheva Yu. A. et al.** (2026). Selection of yeast strain for fermentation of wheat-blackcurrant wort in grain-fruit distillate technologies. *Food Systems,* 9(2), 234–240. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2026-9-2-234-240

amount of side metabolites, while for wine strains it was 16.8...18.9%. The choice of 985-T yeast was justified by the resulting improved quality of wheat-blackcurrant wash: an increase in alcohol yield by 3.7–4.7%, an increased content of aroma-producing metabolites (26.7–28.9%), and reduced concentrations of higher alcohols (440.9–480.9 mg/dm^3) and methanol (79.0–84.0 mg/dm^3). Further research into the transformation of aroma-producing compounds of raw materials at various processing stages is promising for improving grain-fruit distillate technologies: in the process of fermentation during wort preparation, as a result of metabolic transformations under the action of yeast enzymes, and during distillation.

FUNDING: The work was carried out using funds from a subsidy for the implementation of a state assignment (topic no. FGMF-2025-0012).

1. Введение

Отмеченный в последнее время рост популярности крепких спиртных напитков, обладающих интересными органолептическими свойствами, обусловил развитие новых направлений исследований биотехнологического потенциала отечественного растительного сырья для его использования в технологиях оригинальных дистиллированных напитков [1–3]. Исследователи отмечают, что биотехнологический потенциал растительных ресурсов напрямую связан с условиями их подготовки и обработки, позволяющими сохранить исходный состав и первичный аромат, что особенно важно для производства оригинальных напитков [4]. Известно, что фруктовые дистилляты формируют широкий спектр вкусов и ароматов конечного продукта [5,6]. Биохимический состав плодово-ягодного сырья, процессы его микробной трансформации и дистилляции оказывают влияние на образование летучих ароматических компонентов и позволяют направленно регулировать получение фракции дистиллята с наиболее благоприятным ароматическим профилем [7,8].

Результаты последних исследований подтвердили целесообразность переработки плодово-ягодного сырья в смеси с традиционно применяемыми в спиртовом производстве зерновыми культурами для придания напиткам новых сенсорных характеристик [2,9]. Хорошим потенциалом для получения зерно-фруктовых дистиллятов обладает жмых черной смородины — вторичный ресурс соко-морсового производства, в котором после отделения сока остаются неэкстрагируемые фенольные соединения [10–12]. Выявленные перспективы применения жмыха черной смородины как источника цвето-, вкусо- и ароматобразующих соединений в технологиях зерно-фруктовых дистиллятов в основном связаны с наличием в нем пищевых и биологически активных веществ (антоцианов, флавоноидов, фенольных кислот, пищевых волокон, витаминов и микроэлементов) [13–15]. Это позволяет обогатить сусло дополнительным количеством растворимых углеводов и азотистых веществ, а также различными фенольными соединениями, которые могут придавать напиткам брожения оригинальные органолептические свойства [16].

Приведенные в публикациях данные показывают, что достаточно широко исследованы особенности биохимического состава черносмородинового сырья [14–17]; охарактеризованы профили летучих ароматических соединений, таких как спирты, альдегиды, сложные эфиры и терпены, в зависимости от сорта ягод, стадии созревания, термической и ферментативной обработки [18–20]. Показана возможность использования жмыха как сырьевого компонента в технологии зерно-фруктовых дистиллятов, изучено его влияние на техно-химические показатели и реологические свойства сусла и предложены технические решения для приготовления сусла из зерна пшеницы и жмыха черной смородины [9,16]; установлено влияние технологических параметров и условий приготовления пшенично-черносмородинового сусла на процесс спиртового брожения [21,22]. Сенсорный анализ спиртных напитков, приготовленных из черносмородинового сырья, подтвердил наличие в них ярко выраженного аромата черной смородины [23,24]. Однако практически не исследовано влияние генетических особенностей различных рас дрожжей на формирование качественных характеристик зерно-фруктовых дистиллятов.

Известно, что дрожжи и процессы их метаболизма являются ключевым фактором, влияющим на качество напитков в бродильных производствах [25,26]. Промышленные штаммы дрожжей различаются не только уровнем своей бродильной активности, но и способностью к синтезу ароматообразующих соединений [27,28]. В результате жизнедеятельности дрожжей образуются сопутствующие синтезу этанола побочные и вторичные продукты брожения, концентрация и состав которых зависят как от вида перерабатываемого сырья и условий технологического процесса, так и от используемой расы дрожжей [29–31]. Основная роль летучих метаболитов — формирование вкуса и аромата напитков брожения. Исследователями установлено, что качественные характеристики алкогольной продукции из фруктового сырья обусловлены прежде всего не столько высоким уровнем образования дрожжами летучих компонентов, сколько составом их отдельных соединений, особенно сложных эфиров и альдегидов [32–34]. Исследования процессов сбраживания плодово-ягодного сырья позволили отобрать перспективные расы дрожжей, обеспечивающие не только синтез этилового спирта, но и образование в напитках сбалансированного состава летучих ароматообразующих компонентов [26,34].

Особенности биохимического состава сусла, приготовленного из нетрадиционного фруктового сырья в смеси зерновым, требуют проведения дополнительных исследований. Они должны быть направлены на рациональный выбор расы дрожжей, обеспечивающей наиболее полное сбраживание углеводов и образование летучих компонентов, влияющих на органолептические свойства целевых напитков. Как показали результаты последних исследований, введение жмыха черной смородины в качестве нетрадиционного сырья в технологии зерно-фруктовых дистиллятов положительно повлияло на процессы метаболизма промышленной расы спиртовых дрожжей. Также это способствовало снижению общего содержания вторичных метаболитов (в основном за счет высших спиртов) и увеличению доли ценных ароматобразующих летучих компонентов [22]. Однако вопросам подбора рас дрожжей, обеспечивающих наиболее эффективное сбраживание зерно-фруктового сусла, в состав которого входит жмых черной смородины, уделено недостаточно внимания; отсутствуют также данные сравнительных исследований уровня образования расами дрожжей этанола и сопутствующих летучих метаболитов, что требует проведения дальнейших исследований.

Цель данной работы состояла в изучении особенностей метаболизма различных рас дрожжей *Saccharomyces cerevisiae* при сбраживании пшенично-черносмородинового сусла и отборе штамма, наиболее перспективного для производства зерно-фруктовых дистиллятов.

2. Объекты и методы

Объектами исследований служили: пшенично-черносмородиновое сусло и бражки; расы спиртовых дрожжей *S. cerevisiae* (985-Т и 1054) и винных дрожжей *S. cerevisiae* («Москва 30» и «Черносмородиновая») из коллекции микроорганизмов ВНИИПБТ.

Приготовление сусла осуществляли разработанными ранее способами гидродинамической и ферментативной обработки зерна пшеницы и жмыха черной смородины: I — способом совместной подготовки сырьевых компонентов на всех стадиях технологического процесса; II — раздельной подготовки пшеницы и жмыха черной смородины, при котором соединение пшеничного замеса с ферментированным черносмородиновым жмыхом происходило на стадии осахаривания и протеолиза [22]. Состав и соотношение сырьевых компонентов в сусле (гидромодуль 1:3): пшеницы — 70% и жмыха черной смородины — 30% [16].

Для биокаталитической конверсии полимеров зерно-фруктового сырья при подготовке сусла использовали следующие ферментные препараты (ФП): на стадии приготовления замеса — источники термостабильной α-амилазы («Неозим АА 180», Hunan Hong Ying Xiang Biochemistry Industry Co., LTD, КНР), ксиланазы («Виско-лаза 150L», Shandong Longda Bio-products, КНР), дозируя их из расчета 0,5 ед. АС/г крахмала и 0,3 ед. КС/г сырья. На стадии осахаривания и протеолиза вносили ФП — источники глюкоамилазы («Биозим 800L», Shandong Longda Bio-products, КНР) и комплекса протеаз (КФП, ВНИИПБТ, РФ), дозируя их из расчета 8,0 ед. ГлС/г крахмала и 0,3 ед. ПС/г сырья [16,22].

Сравнительные исследования физиологической активности различных рас дрожжей осуществляли методом постановки бродильных проб[1]. Процесс сбраживания сусла, приготовленного с использованием зерна пшеницы и ферментированного жмыха черной смородины, проводили в одинаковых анаэробных условиях при температуре 30 °С. Для сбраживания использовали водную суспензию клеток дрожжей *S. cerevisiae*, которую вносили в зерно-фруктовое

[1] Поляков, В. А., Абрамова, И. М., Полыгалина, Г В., Римарева Л. В., Корчагина Г. Т., Пискарева Е. Н. (2007). Инструкция по технохимическому и микробиологическому контролю спиртового производства. М.: ДеЛи принт, 2007.

сусло из расчета 10 млн клеток/см^3 сусла. Процесс генерации дрожжей контролировали путем подсчета количества клеток в камере Горяева с периодическим микроскопированием.

Показатели сусла и бражки определяли по общепринятым методикам технохимического контроля спиртового производства[1]. Растворимые сухие вещества (РСВ) сусла фиксировали на рефрактометре Rochet PAL-S (ATAGO, Япония); значение pH сусла измеряли на pH-метре/иономере (Mettler-Toledo SevenCompact™, Швейцария); содержание аминного азота — методом йодометрического титрования[2]; общих (ОРВ) и растворимых редуцирующих веществ (РВ) — колориметрическим методом с использованием спектрофотометра Specord 50 (Analytik Jena, Германия); фенольных веществ — спектрофотометрическим методом на Specord 50 (Analytik Jena, Германия) [35]; вязкость сусла — на вискозиметре SV-10 (AND, Япония). Концентрацию этанола в бражке замеряли на анализаторе относительной плотности спирта Densimat-Alcomat 2 (Gibertini, Италия); состав и содержание летучих метаболитов, синтезируемых дрожжами, тестировали с использованием газового хроматографа серии HP Agilent 6890 (Agilent, США).

Статистическую обработку новых экспериментальных данных, полученных не менее чем в трех повторностях, осуществляли методом однофакторного дисперсионного анализа (ANOVA) с апостериорным критерием Тьюки с использованием программы Statistica 6.0. Достоверными считали различия при $p < 0,05$.

3. Результаты и их обсуждение

Показатели пшенично-черносмородинового сусла, приготовленного в соответствии с разработанными ранее схемами раздельной и совместной подготовки сырьевых компонентов [22], представлены в Таблице 1. Анализ данных подтвердил, что полученное сусло, обогащенное аминным азотом и фенольными веществами, характеризовалось высокой степенью осахаривания крахмала (более 90% углеводов переведены в растворимое состояние). Существенных различий в его биохимическом составе в зависимости от способа приготовления не наблюдалось.

Результаты сравнительных исследований процессов роста и развития различных рас дрожжей *S. cerevisiae* на зерно-фруктовом сусле показали, что наиболее высокая концентрация дрожжевых клеток (166–172 млн/см^3) отмечена через 20 ч при генерации спиртовых дрожжей расы 985-Т, что в среднем на 20% превысило показатели винных дрожжей (135–143 млн/см^3). Значимого влияния способа приготовления сусла на рост и развитие дрожжевых клеток выявлено не было ($p = 0,809$) (Таблица 2).

[2] Общая фармакопейная статья: ОФС.1.2.3.0022.15 Определение аминного азота методами формольного и йодометрического титрования. Электронный ресурс: https://pharmacopoeia.regmed.ru/pharmacopoeia-projects/izdanie-13/1/1-2/1-2-3/1-2-3-22/?vers=778. Дата доступа: 24 апреля 2024.

Использование спиртовых рас дрожжей привело к более интенсивному и глубокому сбраживанию сахаров: к 18 ч брожения содержание остаточных углеводов снизилось более чем в 7 раз (с 16,9–17,4 г/100 см^3 до 2,1–2,6 г/100 см^3), в то время как в образцах с винными дрожжами этот показатель сократился в 4 раза и составил 3,7–4,5 г/100 см^3 (Рисунок 1). Наиболее интенсивно процесс протекал при использовании расы 985-Т: к 48 ч брожение практически закончилось и концентрация остаточных РВ составила 0,27–0,31 г/100 см^3; на стадии дображивания содержание РВ к 72 ч снизилось до 0,24 г/100 см^3. Винные расы дрожжей («Москва 30» и «Черносмородиновая») осуществляли более замедленное брожение, и к 72 ч концентрация остаточных углеводов составила 0,34–0,38 г/100 см^3. Способ приготовления зерно-фруктового сусла практически не оказывал значимого влияния на эффективность сбраживания углеводов (Рисунок 1а и Рисунок 1b).

Результаты сравнительного анализа процессов выделения диоксида углерода (Рисунок 2) и образования этанола (Рисунок 3) при сбраживании пшенично-черносмородинового сусла расами спиртовых и винных дрожжей подтвердили полученные данные о потреблении углеводов (Рисунок 1). Наибольшую активность по количеству выделившегося CO_2 проявила раса спиртовых дрожжей 985-Т, при использовании которой уже к 48 ч углеводы были практически полностью сброжены с образованием максимального количества диоксида углерода (12,3 г). В образцах с применением винных рас дрожжей объем выделившегося к этому времени CO_2 составил 11,6–11,9 г (Рисунок 2).

Аналогичная закономерность отмечена и при синтезе этилового спирта в процессе сбраживания пшенично-черносмородинового сусла различными расами дрожжей. Наиболее высокая концентрация этанола в бражках на 72 ч была отмечена при использовании дрожжей *S. cerevisiae* 985-Т и составила 10,5–10,6% об. (Рисунок 3). Бродильная способность винных дрожжей уступала спиртовым: концентрация этанола составила 10,1–10,3% об.

Анализ биохимического состава полученных образцов бражек показал наличие в них аминного азота (51,7–54,7 мг, %) и фенольных веществ (1182,5–1358,7 мг/дм^3), влияющих на формирование сенсорных характеристик целевой продукции (Таблица 3). Наиболее высокий выход спирта был достигнут при использовании спиртовых рас дрожжей 985-Т (67,6–67,9 г/100 г условного крахмала) и 1054 (67,4–67,8 г/100 г условного крахмала). Использование винных рас дрожжей приводило к снижению интенсивности процесса брожения и к уменьшению выхода спирта (64,7–65,4 г/100 г условного крахмала) (Рисунок 2, Таблица 3).

Полученные результаты свидетельствуют о преимуществе использования спиртовых рас дрожжей в технологиях зерно-фруктовых дистиллятов, особенно расы *S. cerevisiae* 985-Т, обеспечивающей интенсивное сбраживание сусла и более высокий выход спирта (на 3,7–4,7%) (Рисунок 2, Рисунок 3, Таблица 3). Однако наряду с технологическими показателями процесса производства спиртных напитков

Таблица 1. **Биохимический состав пшенично-черносмородинового сусла, приготовленного способом совместной и раздельной подготовки сырьевых компонентов**

Table 1. **Biochemical composition of wheat-blackcurrant wort prepared by the method of combined and separate preparation of raw components**

РСВ сусла, %	pH		Редуцирующие вещества, %		Вязкость, мПа·сек	Аминный азот, мг%	Фенольные вещества, мг/дм^3
	замеса	сусла	Растворимые (РВ)	Общие (ОРВ)			
Способ совместной подготовки сырьевых компонентов							
21,9±1,5	5,1±0,1	4,8±0,1	16,9±0,7	17,8±0,8	11,6±0,5	53,1±2,2	994,5±31,0
Способ раздельной подготовки сырьевых компонентов							
21,8±1,1	5,5±0,1	5,2±0,1	17,4±0,8	18,4±0,9	11,1±0,4	48,7±2,1	1037,0±38,6

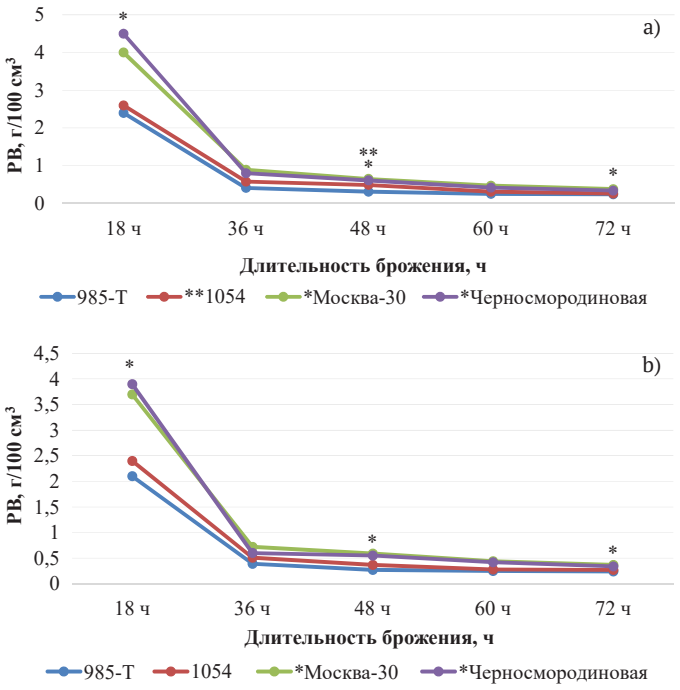
Примечание: значения представлены в виде средних±стандартное отклонение. Все данные статистически достоверны при $p < 0,05$, существенных различий в биохимическом составе сусла в зависимости от способа приготовления не наблюдалось.

Таблица 2. **Динамика роста и развития дрожжей при сбраживании пшенично-черносмородинового сусла различными расами дрожжей *S. cerevisiae***

Table 2. **Dynamics of yeast growth and development during fermentation of wheat-blackcurrant wort with different races of *S. cerevisiae* yeast**

Расы дрожжей	Способ приготовления сусла	Кол-во клеток, млн/см^3			Почкующиеся клетки, %			p^{a*}	p^b
		20 ч	42 ч	70 ч	20 ч	42 ч	70 ч		
985-Т	совместный	172	169	108	23	15	0	–	0,384
	раздельный	166	167	98	14	11	0	–	
1054	совместный	**150**	115	90	13	11	0	***0,028***	0,878
	раздельный	**149**	121	89	14	10	0	***0,041***	
Москва 30	совместный	**140**	127	115	16	14	0	***0,008***	0,461
	раздельный	**135**	102	90	11	13	0	***0,006***	
Черно-смородиновая	совместный	**141**	139	106	11	14	0	***0,009***	0,761
	раздельный	**143**	134	114	14	13	0	***0,016***	

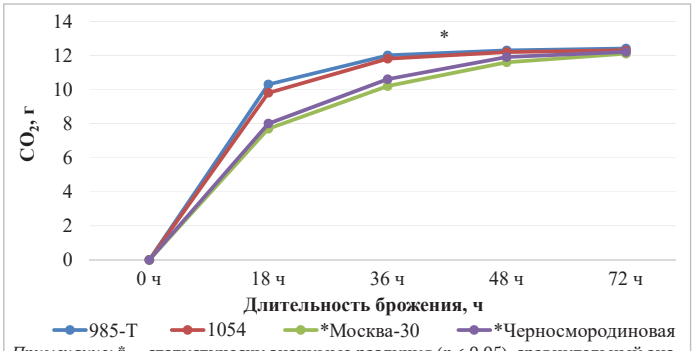
Примечание:* — значения $p < 0,05$ выделены жирным шрифтом; сравнительный анализ между: p^a — расами дрожжей (в сравнении с 985-Т); p^b — группами по способу приготовления сусла (показатель: кол-во клеток, млн/см^3 на 20 ч).



Примечание: * — статистически значимые различия ($p < 0,05$), сравнительный анализ показателей (на 18 ч, 48 ч, 72 ч) между группами (в сравнении с 985-Т); ** — статистически значимые различия ($p < 0,05$), сравнительный анализ показателей 985-Т и 1054 (48 ч).

Рисунок 1. **Динамика потребления углеводов различными расами дрожжей *S. cerevisiae* при сбраживании пшенично-черносмородинового сусла, приготовленного способами совместной (a) и раздельной (b) подготовки сырьевых компонентов**

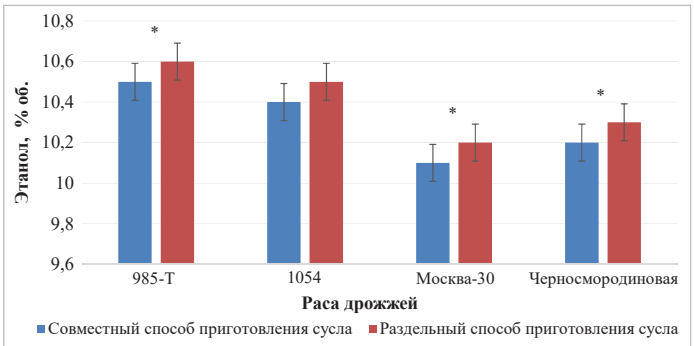
Figure 1. **Dynamics of carbohydrate consumption by different races of *S. cerevisiae* yeast during fermentation of wheat-blackcurrant wort prepared by methods of combined (a) and separate (b) preparation of raw components**



Примечание: * — статистически значимые различия ($p < 0,05$), сравнительный анализ показателей (на 48 ч) между группами (в сравнении с 985-Т).

Рисунок 2. **Динамика выделения диоксида углерода при сбраживании пшенично-черносмородинового сусла расами спиртовых и винных дрожжей**

Figure 2. **Dynamics of carbon dioxide emission during fermentation of wheat-blackcurrant wort with races of alcohol and wine yeasts**



Примечание: * статистически значимые различия ($p < 0,05$) между группами.

Рисунок 3. **Влияние расы дрожжей на образование этанола в пшенично-черносмородиновых бражках**

Figure 3. **The influence of yeast strain on ethanol formation in wheat-blackcurrant wash**

Таблица 3. **Показатели бражек, полученных при сбраживании пшенично-черносмородинового сусла различными расами дрожжей**

Table 3. **Indicators of wash obtained by fermenting wheat-blackcurrant wort with different yeast strains**

Расы дрожжей	Способ приготовления сусла	Фенольные вещества, мг/дм³	Аминный азот, мг %	Выход спирта,		p^{a*}	p^b
				г/100 г условного крахмала	% от максимума		
985-Т	совместный	1261,7±30,3	52,0±0,3	67,9±0,8	100	—	0,651
	раздельный	1340,5±33,1	51,7±0,3	67,6±0,7	99,6	—	
1054	совместный	1270,5±30,4	53,8±0,3	67,7±0,8	99,8	0,786	0,654
	раздельный	1190,0±30,1	52,1±0,3	67,4±0,7	99,3	0,733	
Москва 30	совместный	1352,3±32,3	53,4±0,2	64,7±0,7	95,3	0,010	0,603
	раздельный	1314,4±31,9	52,9±0,2	65,0±0,6	95,7	0,009	
Черно-смородиновая	совместный	1358,7±31,3	54,7±0,3	65,1±0,8	95,9	0,015	0,631
	раздельный	1182,5±30,1	52,5±0,2	65,4±0,6	96,3	0,016	

Примечание: * — значения $p < 0,05$ выделены жирным шрифтом; сравнительный анализ между: p^a — расами дрожжей (в сравнении с 985-Т); p^b — группами по способу приготовления сусла (показатель: выход спирта, г/100 г условного крахмала).

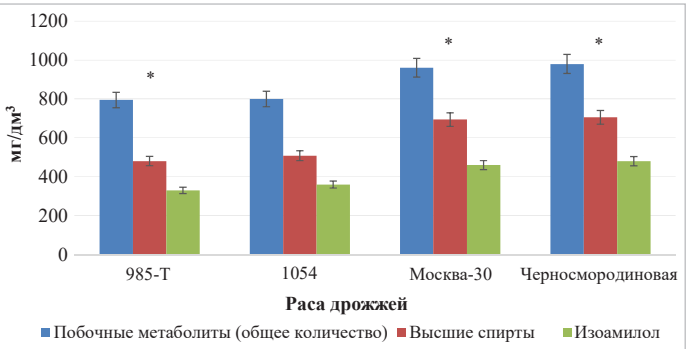
важную роль играют показатели их безопасности и сенсорной оценки [9,36]. Качественные характеристики зерно-фруктовых дистиллятов зависят от состава и концентрации сопутствующих синтезу этанола побочных и вторичных продуктов брожения.

Как известно, состав и уровень образования летучих метаболитов в основном обусловлен генетическим особенностями расы дрожжей, биохимическим составом сырья, используемого для приготовления питательной среды, и условиями брожения [29,30,31]. Результаты исследований влияния расы дрожжей и способа приготовления сусла на образование летучих компонентов пшенично-черносмородиновой бражки показали, что их суммарное содержание варьировало в пределах от 794,56 до 979,71 мг/дм³ при сбраживании сусла, приготовленного совместным способом, и от 709,47 до 878,69 мг/дм³ — при сбраживании сусла, приготовленного раздельным способом (Рисунок 4).

Основу побочных продуктов брожения составляли высшие спирты (1,2-пропанол, изобутанол, изоамилол, 1-пентанол, гексанол), из которых основное содержание приходилось на изоамиловый спирт — более 50% от общего количества. Способ приготовления зерно-фруктового сусла не оказывал существенного влияния на метаболизм дрожжей: сохранялись основные закономерности синтеза летучих компонентов, несмотря на несколько более высокий уровень образования побочных метаболитов при сбраживании сусла, приготовленного совместным способом (Рисунки 4а и 4b).

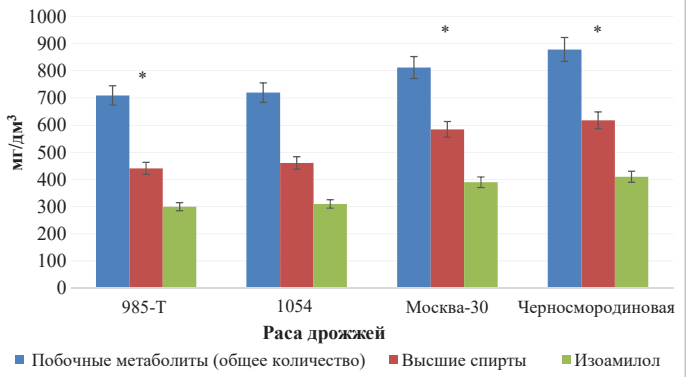
Содержание и состав продуктов брожения в большей степени зависели от расы дрожжей. Так, в образцах бражки, полученных при использовании спиртовых дрожжей, отмечена более низкая концентрация высших спиртов (более чем на 30%), в том числе изоамилола, изобутанола и пропанола, по сравнению с винными расами (Рисунок 4). Повышенная концентрация изоамилового и изобутилового спиртов может приводить к появлению сивушных тонов и жгучего вкуса в зерно-фруктовых дистиллятах и негативно сказываться на органолептических показателях напитков [36].

Анализ данных по содержанию ароматообразующих компонентов в отгонах зерно-фруктовых бражек показал, что наиболее высокий уровень синтеза альдегидов (ацетальдегида, кротональдегида, бензальдегида), ароматических спиртов (бензалкоголя и фенилэтанола) и сложных эфиров (этилацетата, этиллактата, этилкапрата, этилкапроата, этилкаприлата), являющихся одними из основных маркеров



Примечание: * статистически значимые различия (p < 0,05) между группами (в сравнении с 985-Т).

а) совместный способ приготовления сусла

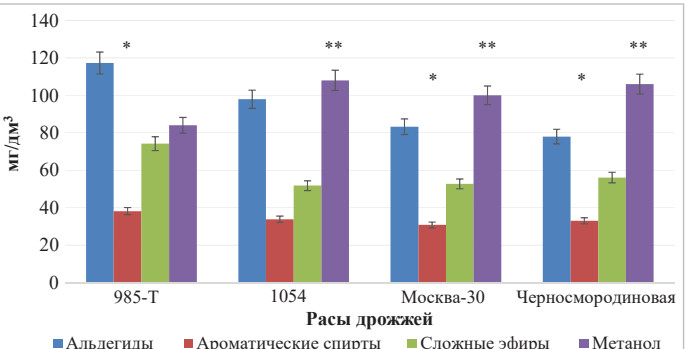


Примечание: * статистически значимые различия (p < 0,05) между группами (в сравнении с 985-Т)

b) раздельный способ приготовления сусла

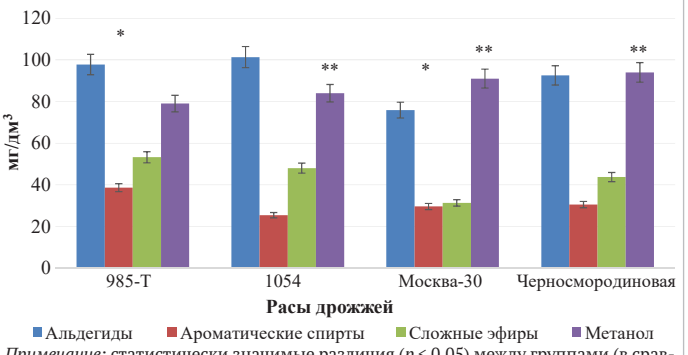
Рисунок 4. **Влияние расы дрожжей и способа приготовления пшенично-черносмородинового сусла на образование общего количества побочных метаболитов, высших спиртов и изоамилола**

Figure 4. **The influence of yeast strain and method of wheat-blackcurrant wort preparation on the production of the total amount of side metabolites, higher alcohols and isoamylol**



Примечание: статистически значимые различия (p < 0,05) между группами (в сравнении с 985-Т) (показатель * — суммарная концентрация ароматообразующих компонентов, мг/дм³; ** — метанол, мг/дм³).

а) совместный способ приготовления сусла



Примечание: статистически значимые различия (p < 0,05) между группами (в сравнении с 985-Т) (показатель * — суммарная концентрация ароматообразующих компонентов, мг/дм³; ** — метанол, мг/дм³).

b) раздельный **способ приготовления сусла**

Рисунок 5. **Влияние расы дрожжей и способа приготовления пшенично-черносмородинового сусла на синтез метанола и ароматообразующих метаболитов (альдегидов, ароматических спиртов, сложных эфиров)**

Figure 5. **The influence of yeast strain and method of wheat-blackcurrant wort preparation on synthesis of methanol and aroma-producing metabolites (aldehydes, aromatic alcohols, esters)**

цветочно-фруктовых ароматов в спиртных напитках [23,36,37], наблюдался при использовании дрожжей *S. cerevisiae* 985-Т (Рисунок 5). Их суммарная концентрация в основном зависела от расы дрожжей, а также от способа приготовления сусла и соответствовала показателям 189,55–229,63 мг/дм³ (дрожжи расы 985-Т); 174,71–183,44 мг/дм³ (дрожжи расы 1054); 136,72–166,75 мг/дм³ (винных дрожжей «Москва-30») и 166,71–168,05 мг/дм³ (винных дрожжей «Черносмородиновая») (Рисунки 5a и 5b). Доля соединений, формирующих ароматический профиль напитков, от общего количества побочных метаболитов составила 22,9–28,9 % (у спиртовых рас дрожжей) и 16,8–18,9 % (у винных рас). При использовании дрожжей 985-Т содержание ароматообразующих метаболитов составило 26,7–28,9 % (Рисунок 4 и Рисунок 5).

Содержание метанола в исследованных образцах бражек изменялось в пределах от 79,0 до 108 мг/дм³ в зависимости от используемой расы дрожжей (Рисунок 5). Наиболее низкий уровень синтеза метанола отмечен у дрожжей расы 985-Т: его концентрация составила 79,0–84,0 мг/дм³ и практически не зависела от способа приготовления сбраживаемого пшенично-черносмородинового сусла (p = 0,445).

Полученные результаты показали преимущество использования дрожжей *S. cerevisiae* 985-Т в производстве оригинальных дистиллятов по сравнению с исследованными расами. Это обусловлено более эффективными метаболическими процессами, проявляющимися при сбраживании пшенично-черносмородинового сусла, и, как следствие, более высокими качественными показателями получаемых бражек (концентрация этанола, содержание и состав ароматообразующих компонентов).

Выводы

В результате сравнительных исследований процессов метаболизма различных рас дрожжей *S. cerevisiae* при сбраживании сусла, приготовленного из зерна пшеницы и жмыха черной смородины, выявлено преимущество использования спиртовых рас, обеспечивающих более интенсивное сбраживание углеводов. Содержание углеводов к 18 ч снижалось более чем в 7 раз, тогда как в образцах с винными дрожжами — в 4 раза; при этом отмечено увеличение выхода спирта на 3,7–4,5 %. Установлено, что раса *S. cerevisiae* 985-Т проявила наиболее высокую бродильную активность, и к 48 ч углеводы были практически полностью сброжены (0,27–0,31 г/100 см³); также было образовано максимальное количество CO_2 (12,3 г) и этанола (10,5–10,6 % об.). Способ приготовления сусла не оказывал значимого влияния на эффективность процессов генерации дрожжей, их метаболизма и спиртового брожения.

Сравнительный анализ содержания побочных метаболитов, сопутствующих синтезу этанола, в отгонах зерно-фруктовых бражек показал, что при использовании спиртовых дрожжей снижалось образование высших спиртов более чем на 30 %, в том числе изоамилола, изобутанола и пропанола, по сравнению с винными расами. При этом отмечалось увеличение синтеза ароматообразующих соединений (альдегидов, ароматических спиртов и сложных эфиров). Установлено, что раса дрожжей 985-Т проявляла наиболее высокую способность к образованию соединений, формирующих ароматический профиль напитков — их содержание составило 26,7–28,9 % от общего количества (у винных рас — 16,8–18,9 %). Способ приготовления зерно-фруктового сусла не оказывал существенного влияния на метаболизм дрожжей: сохранялись основные закономерности синтеза летучих компонентов, несмотря на более высокий уровень образования побочных метаболитов при сбраживании сусла, приготовленного совместным способом.

В результате исследований обоснован выбор перспективного штамма дрожжей *S. cerevisiae* 985-Т, обладающего высокой бродильной активностью и способностью к синтезу ароматообразующих соединений. Штамм характеризуется сбалансированным качественным и количественным составом летучих компонентов при минимальной концентрации метанола.

Полученные результаты показывают, что дальнейшие исследования для совершенствования технологий новых спиртных напитков должны быть направлены на изучение трансформации состава

ароматообразующих соединений зерно-фруктового сырья на разных технологических этапах его переработки: в процессе ферментации при приготовлении сусла, в результате метаболических превращений под действием ферментов дрожжей и при получении дистиллятов. Необходимы также исследования влияния этих соединений на формирование органолептических характеристик напитков.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / REFERENCES

1. Абрамова, И. М., Туршатов, М. В., Соловьев, А. О., Никитенко, В. Д., Леденев, В. П., Кононенко, В. В. и др. (2023). О производстве этилового спирта и дистиллятов с использованием фруктового сырья совместно с зерновым. *Пищевая промышленность*, 5, 67–69. [Abramova, I. M., Turshatov, M. V., Solovyov, A. O., Nikitenko, V. D., Ledenev, V. P., Kononenko, V. V. et al. (2023). On the production of ethyl alcohol and distillates using fruit raw materials together with grain. *Food Industry*, 5, 67–69. (In Russian)] https://doi.org/10.52653/PPI.2023.5.5.019
2. Головачева, Н. Е., Абрамова, И. М., Морозова, С. С. (2023). О возможности получения спиртных напитков на основе зернового и плодового сырья. *Пищевая промышленность*, 7, 18–23. [Golovacheva, N. E., Abramova, I. M., Morozova, S. S. (2023). About the possibility of obtaining alcoholic beverages based on grain and fruit raw materials. *Food Industry*, 7, 18–23. (In Russian)] https://doi.org/10.52653/PPI.2023.7.7.004
3. Калинина, А. Г., Абрамова, И. М., Головачева, Н. Е. (2019). Влияние виски и виского дистиллята на живой организм. *Контроль качества продукции*, 12, 44–46. [Kalinina, A.G., Abramova, I. M., Golovacheva, N. E. (2019). The effect of whiskey and whiskey distillate on a living organism. *Production Quality Control*, 12, 44–46. (In Russian)]
4. Kujawa, J., Guillen-Burrieza, E., Arafat, H. A., Kurzawa, M., Wolan, A., Kujawski, W. (2015). Raw juice concentration by osmotic membrane distillation process with hydrophobic polymeric membranes. *Food and Bioprocess Technology*, 8, 2146–2158. https://doi.org/10.1007/s11947-015-1570-4
5. Дубинина, Е. В., Крикунова, Л. Н. (2023). Роль активаторов брожения в формировании качественных характеристик фруктовых (плодовых) дистиллятов. *Ползуновский вестник*, 1, 20–28. [Dubinina, E. V., Krikunova, L. N. (2023). Role of fermentation activators in formation of qualitative characteristics of fruit distillates. *Polzunovskiy Vestnik*, 1, 20–28. (In Russian)] https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2023.01.003
6. Marsol-Vall, A., Kortesniemi, M., Karhu, S. T., Kallio, H., Yang, B. (2018). Profiles of volatile compounds in blackcurrant (*Ribes nigrum*) cultivars with a special focus on the influence of growth latitude and weather conditions. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 66(28), 7485–7495. https://doi.org/10.1021/acs.jafc.8b02070
7. Крикунова, Л. Н., Ульянова, Е. В., Трофимченко, В. А., Ободеева, О. Н. (2023). Влияние биохимического состава фруктового сырья на процесс новообразования летучих компонентов при дистилляции. *Ползуновский Вестник*, 2, 22–30. [Krikunova, L. N., Ulyanova, E. V., Trofimchenko, V. A., Obodeeva, O. N. (2023). Fruit raw biochemical composition influence to volatile components formation process during distillation. *Polzunovskiy Vestnik,* 2, 22–30. (In Russian)] https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2023.02.003
8. Stoica, F., Muntean, C., Giugea, N., Mărăcineanu, L., Ionete, R. (2020). Volatile compounds in different fractions of fruits distillate obtained by traditional distillation. *Scientific Bulletin Series F. Biotechnologies*, 24(2), 17–24.
9. Римарева, Л. В., Серба, Е. М., Соколова, Е. Н., Игнатова, Н. И., Фурсова, Н. А. (2023). К вопросу целесообразности использования ягод черной смородины для получения оригинальных зерно-фруктовых дистиллятов. *Пищевая промышленность*, 5, 61–63. [Rimareva, L. V., Serba, E. M., Sokolova, E. N., Ignatova, N. I., Fursova, N. A. (2023). On the question of the expediency of using black currant berries to obtain original grain-fruit distillates. *Food Industry*, 5, 61–63. (In Russian)] https://doi.org/10.52653/PPI.2023.5.5.017
10. Zeng, Y., Zhou, W., Yu, J., Zhao, L., Wang, K., Hu, Z. et al. (2023). By-products of fruit and vegetables: Antioxidant properties of extractable and non-extractable phenolic compounds. *Antioxidants,* 12(2), Article 418. https://doi.org/10.3390/antiox12020418
11. Blejan, A. M., Nour, V., Păcularu-Burada, B., Popescu, S. M. (2023). Wild bilberry, blackcurrant, and blackberry by-products as a source of nutritional and bioactive compounds. *International Journal of Food Properties*, 26(1), 1579–1595. https://doi.org/10.1080/10942912.2023.2224530
12. Коденцова, В. М., Рисник, Д. В., Серба, Е. М., Абрамова, И. М., Соколова, Е. Н., Крючкова, Е. Р. и др. (2024). Перспективы комплексной переработки ягод черной смородины. *Техника и технология пищевых производств*, 54(3), 621–632. [Kodentsova, V. M., Risnik, D. V., Serba, E. M., Abramova, I. M., Sokolova, E. N., Kryuchkova, E. R. et al. (2024). Prospects for integrated processing of black currant. *Food Processing: Techniques and Technology*, 54(3), 621–632. (In Russian)] https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-3-2525
13. Alba, K., MacNaughtan, W., Laws, A. P., Foster, T. J., Campbell, G. M., Kontogiorgos, V. (2018). Fractionation and characterisation of dietary fibre from blackcurrant pomace. *Food Hydrocolloid,* 81, 398–408. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2018.03.023
14. Акимов, М. Ю., Бессонов, В. В., Коденцова, В. М., Эллер, К. И., Вржесинская, О. А., Бекетова, Н. А. и др. (2020). Биологическая ценность плодов и ягод российского производства. *Вопросы питания*, 89(4), 220–232. [Akimov, M. Yu., Bessonov, V. V., Kodentsova, V. M., Eller, K. I., Vrzhesinskaya, O. A., Beketova, N. A. et al. (2020). Biological value of fruits and berries of Russian production. *Problems of Nutrition*, 89(4), 220–232. (In Russian)] https://doi.org/10.24411/0042-8833-2020-10055
15. Miladinović, B., Randjelovic, M., Djordjevic, B., Mihajilov-Krstev, T., Živanović, S., Milutinović, M. et al. (2025). Comparative analysis of anthocyanins and vitamin C content, antioxidant potential, and antimicrobial activity of eight black currant (*Ribes nigrum* L.) varieties juices. *Chemistry and Biodiversity*, 22(12), Article e01614. https://doi.org/10.1002/cbdv.202501614
16. Серба, Е. М., Соколова, Е. Н., Римарева, Л. В., Ионов, В. В., Игнатова, Н. И., Оверченко, М. Б. (2025). Биотехнологические аспекты технологии приготовления зерно-фруктового сусла из зерна пшеницы и жмыха черной смородины. *Пищевые системы*, 7(4), 551–559. [Serba, E. M., Sokolova, E. N., Rimareva, L. V., Ionov, V. V., Ignatova, N. I., Overchenko, M. B. (2025). Biotechnological aspects of the technology of preparation of grain-fruit wort from wheat grain and blackcurrant cake. *Food Systems,* 7(4), 551–559. (In Russian)] https://doi.org/10.21323/2618-9771-2024-7-4-551-559
17. Ejaz, A., Waliat, S., Afzaal, M., Saeed, F., Ahmad, A., Din, A. et al. (2023). Biological activities, therapeutic potential, and pharmacological aspects of blackcurrants (*Ribes nigrum* L): A comprehensive review. *Food Science and Nutrition*, 11(10), 5799–5817. https://doi.org/10.1002/fsn3.3592
18. Jung, K., Fastowski, O., Poplacean, I., Engel, K.-H. (2017). Analysis and sensory evaluation of volatile constituents of fresh blackcurrant (*Ribes nigrum* L.) fruits. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 65(43), 9475–9487. https://doi.org/10.1021/acs.jafc.7b03778
19. Marsol-Vall, A., Laaksonen, O., Yang, B. (2019). Effects of processing and storage conditions on volatile composition and odor characteristics of blackcurrant (*Ribes nigrum*) juices. *Food Chemistry*, 293, 151–160. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.04.076
20. Pagès-Hélary, S., Dujourdy, L., Cayot, N. (2021). Identification of volatile compounds in blackcurrant berries: Differences among cultivars. *Molecules*, 26(20), Article 6254. https://doi.org/10.3390/molecules26206254
21. Kelanne, N., Yang, B., Liljenbäck, L., Laaksonen, O. (2020). Phenolic compound profiles in alcoholic black currant beverages produced by fermentation with *Saccharomyces* and non-*Saccharomyces* yeasts. *Journal of Agricultural and Food Chemistry,* 68(37), 10128–10141. https://doi.org/10.1021/acs.jafc.0c03354
22. Серба, Е. М., Крючкова, Е. Р., Римарева, Л. В., Игнатова, Н. И., Оверченко, М. Б., Соколова, Е. Н. (2025). Влияние условий приготовления сусла из зерна пшеницы и жмыха черной смородины на процессы метаболизма дрожжей и спиртового брожения. *Российская сельскохозяйственная наука,* 3, 66–71. [Serba, E. M., Kryuchkova, E. R., Rimareva, L. V., Ignatova, N. I., Overchenko, M. B., Sokolova, E. N. (2025). Influence of conditions of preparation of wheat grain wort and blackcurrant cake on yeast metabolism and alcoholic fermentation processes. *Russian Agricultural Sciences*, 3, 66–71. (In Russian)]
23. Kelanne, N. M., Siegmund, B., Metz, T., Yang, B., Laaksonen, O. (2022). Comparison of volatile compounds and sensory profiles of alcoholic black currant (*Ribes nigrum*) beverages produced with *Saccharomyces*, *Torulaspora*, and *Metschnikowia* yeasts. *Food Chemistry*, 370, Article 131049. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.131049
24. Тананайко Т. М., Пушкарь А. А., Гайдым О. И., Трофимов, А. В. (2017). Инновационная технология гайстов — крепких спиртных напитков из отечественного плодово-ягодного сырья. *Пищевая промышленность: наука и технологии*, 1(35), 85–92. [Tananaiko, T. M., Pushkar', A. A., Gaidim, O. I., Trofimov, A. V. (2017). Innovative technology of strong drinks from domestic fruit and raw material — geistes. *Food Industry: Science and Technology*, 1(35), 85–92. (In Russian)]
25. Maicas, S. (2020). The role of yeasts in fermentation processes. *Microorganisms*, 8(8), Article 1142. https://doi.org/10.3390/microorganisms8081142
26. Оганесянц, Л. А., Песчанская, В. А., Дубинина, Е. В., Трофимченко, В. А. (2017). Подбор рас дрожжей для сбраживания фруктовой мезги, предназначенной для дистилляции. *Пиво и напитки*, 6, 26–30. [Oganesyants, L. A., Peschanskaya, V. A., Dubinina, E. V., Trofimchenko, V. A. (2017). Yeast selection for fruit pulp fermentation for further distillation. *Beer and Beverages*, 6, 26–30. (In Russian)]
27. Калинина, И. В., Фаткуллин, Р. И., Попова, Н. В., Шарипова, А. Р. (2018). Оценка эффективности процесса биосинтеза этанола дрожжами рода Saccharomyces. *Вестник ЮУрГУ. Серия: Пищевые и биотехнологии,* 6(4), 74–82. [Kalinina, I.V., Fatkullin, R.I., Popova, N. V., Sharipova, A. R. (2018). The analysis on efficiency of ethanol biosynthesis by saccharomyces yeast. *Bulletin of South Ural State University, Series «Food and Biotechnology»*, 6(4), 74–82. (In Russian)] https://doi.org/10.14529/food180410
28. Панасюк, А. Л., Макаров, С. С. (2018). Влияние различных рас дрожжей на качественные показатели и антиоксидантную активность вин из черной смородины. *Техника и технология пищевых производств,* 48(1), 66–73. [Panasyuk, A. L., Makarov, S. S. (2018). Influence of different yeast races on quality parameters and antioxidant activity of wines produced from blackcurrant. *Food Processing: Techniques and Technology,* 48(1), 66–73. (In Russian)] https://doi.org/10.21603/2074-9414-2018-1-66-73
29. Дубинина, Е. В., Осипова, В. П., Трофимченко, В. А. (2018). Влияние способа подготовки сырья на состав летучих компонентов и выход дистиллятов из малины. *Пиво и напитки*, 1, 30–34. [Dubinina, E. V., Osipova, V. P., Trofimchenko, V. A. (2018). Influence of preparation method on volatile compounds content and output of distillates from raspberry. *Beer and Beverages*, 1, 30–34. (In Russian)]
30. Гнетько, Л. В. Удычак, М. М., Коблева, М. М., Сиюхова, Б. Б. (2022). Исследование влияния условий брожения на содержание ароматообразующих веществ в молодых красных винах. *Новые технологии*, 18(4), 51–59. [Gnetko, L. V., Udychak, M. M., Kobleva, M. M., Siyukhova, B. B. (2022). Study of the influence of fermentation conditions on the content of aroma-forming substances in young red wines. *New Technologies,* 18(4), 51–59. (In Russian)] https://doi.org/10.47370/2072-0920-2022-18-4-51-59
31. Бахарев, В. В., Феоктистов, П. А. (2025). Анализ профиля ароматообразующих соединений в сухой и сладкой плодовой алкогольной продукции из земляники. *Техника и технология пищевых производств,* 55(1), 166–180. [Baharev, V. V., Feoktistov, P. A. (2025). Aroma compounds in dry and sweet strawberry alcoholic beverages. *Food Processing: Techniques and Technology,* 55(1), 166–180. (In Russian)] https://doi.org/10.21603/2074-9414-2025-1-2560

32. Balcerek, M., Pielech-Przybylska, K., Dziekońska-Kubczak, U., Bartosik, A. (2023). Effect of apple cultivar and selected technological treatments on the quality of apple distillate. *Foods*, 12(24), Article 4494. https://doi.org/10.3390/foods12244494
33. Vítová, E., Diviš, P., Pořízka, J., Zemanová, J. (2025). Impact of cultivar and season on the flavor of red, white, and black currants: Integrated instrumental and sensory analysis. *Applied Sciences*, 15(9), Article 5156. https://doi.org/10.3390/app15095156
34. Yang, W., Liu, S., Marsol-Vall, A., Tähti, R., Laaksonen, O., Karhu, S. et al. (2021). Chemical composition, sensory profile and antioxidant capacity of low-alcohol strawberry beverages fermented with *Saccharomyces cerevisiae* and *Torulaspora delbrueckii*. *LWT*, 149, Article 111910. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111910
35. Денисенко, Т. А., Вишникин, А. Б., Цыганок, Л. П. (2015). Спектрофотометрическое определение суммы фенольных соединений в растительных объектах с использованием хлорида алюминия. 18-молибдодифосфата и реактива Фолина-Чокальтеу. *Аналитика и контроль,* 19(4), 373–380. [Denisenko,T. A., Vishnikin, A. B., Tsiganok, L. P. (2015). Spectrophotometric determination of phenolic compounds sum in plants using aluminum chloride, 18-molybdodiphosphate and Folin-Ciocalteu reagents. *Analytics and Control,* 19(4), 373–380. (In Russian)] https://doi.org/10.15826/analitika.2015.19.4.012
36. Оганесянц, Л. А., Песчанская, В. А., Осипова, В. П., Дубинина, Е. В., Алиева, Г. А. (2013). Качественный и количественный состав летучих компонентов плодовых водок. *Виноделие и виноградарство,* 6, 22–24. [Oganesyants, L. A., Peschanskaya, V. A., Osipova, V. P., Dubinina, E. V., Aliyeva, G. A. (2013). Qualitative and quantitative composition of the volatile components of fruit vodkas. *Winemaking and Viticulture,* 6, 22–24. (In Russian)]
37. Shi, Z., Li, W., Chen, Z., Peng, Z., Ma, M., Zhang, J. et al. (2024). Exploring the impact of different *Saccharomyces cerevisiae* strains on the flavor profile of greengage alcoholic beverage using GC-E-Nose, HS-GC–IMS, and HS-SPME-GC–MS. *Foods*, 13(24), Article 3984. https://doi.org/10.3390/foods13243984

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ	AUTHOR INFORMATION
Принадлежность к организации	**Affiliation**
Серба Елена Михайловна — доктор биологических наук, доцент, профессор РАН, член-корреспондент РАН, Заместитель директора по научной работе, Всероссийский научно-исследовательский институт пищевой биотехнологии — филиал Федерального исследовательского центра питания, биотехнологии и безопасности пищи Россия, 111033, Москва, Самокатная ул., 4-Б E-mail: serbae@mail.ru ORCID: http://orcid.org/0000-0002-1660-2634	**Elena M. Serba**, Doctor of Biological Sciences, Docent, Professor of the Russian Academy of Sciences, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Deputy Director for Research, All-Russian Scientific Research Institute of Food Biotechnology is a branch of the Federal Research Centre of Nutrition, Biotechnology and Food Safety 4-B, Samokatnaya str., Moscow, 111033, Russia E-mail: serbae@mail.ru ORCID: http://orcid.org/0000-0002-1660-2634
Крючкова Елизавета Романовна — аспирант, инженер-технолог I категории, лаборатория биотехнологии пекарных дрожжей, Всероссийский научно-исследовательский институт пищевой биотехнологии — филиал Федерального исследовательского центра питания, биотехнологии и безопасности пищи Россия, 111033, Москва, Самокатная ул., 4-Б E-mail: kruchkovaer@gmail.com ORCID: http://orcid.org/0000-0001-8012-0907	**Elizaveta R. Kryuchkova**, Postgraduate Student, 1st category process engineer, Laboratory of Baker's Yeast Biotechnology, All-Russian Scientific Research Institute of Food Biotechnology is a branch of the Federal Research Centre of Nutrition, Biotechnology and Food Safety 4-B, Samokatnaya str., Moscow, 111033, Russia E-mail: kruchkovaer@gmail.com ORCID: http://orcid.org/0000-0001-8012-0907
Юраскина Татьяна Владимировна — кандидат технических наук, отдел биотехнологии ферментов, дрожжей, органических кислот и биологически-активных добавок, Всероссийский научно-исследовательский институт пищевой биотехнологии — филиал Федерального исследовательского центра питания, биотехнологии и безопасности пищи Россия, 111033, Москва, Самокатная ул., 4-Б E-mail: tatyanavladyuraskina@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6877-9933 * автор для контактов	**Tatyana V. Yuraskina**, Candidate of Technical Sciences, Researcher, Department of Biotechnology of Enzymes, Yeasts, Organic Acids and Dietary Supplements, All-Russian Scientific Research Institute of Food Biotechnology is a branch of the Federal Research Centre of Nutrition, Biotechnology and Food Safety 4-B, Samokatnaya str., Moscow, 111033, Russia E-mail: tatyanavladyuraskina@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6877-9933 * corresponding author
Римарева Любовь Вячеславовна — доктор технических наук, профессор, академик РАН, главный научный сотрудник, отдел биотехнологии ферментов, дрожжей, органических кислот и биологически-активных добавок, Всероссийский научно-исследовательский институт пищевой биотехнологии — филиал Федерального исследовательского центра питания, биотехнологии и безопасности пищи Россия, 111033, Москва, Самокатная ул., 4-Б E-mail: lrimareva@mail.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3097-0836	**Liubov V. Rimareva**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Academician of the Russian Academy of Sciences, Chief Researcher, Department of Biotechnology of Enzymes, Yeasts, Organic Acids and Dietary Supplements, All-Russian Scientific Research Institute of Food Biotechnology is a branch of the Federal Research Centre of Nutrition, Biotechnology and Food Safety 4-B, Samokatnaya str., Moscow, 111033, Russia E-mail: lrimareva@mail.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3097-0836
Гаврилова Дарья Алексеевна — аспирант, Всероссийский научно-исследовательский институт пищевой биотехнологии — филиал Федерального исследовательского центра питания, биотехнологии и безопасности пищи Россия, 111033, Москва, Самокатная ул., 4-Б E-mail: tehnohimkontrol@mail.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2834-2411	**Daria A. Gavrilova**, Postgraduate Student, All-Russian Scientific Research Institute of Food Biotechnology is a branch of the Federal Research Centre of Nutrition, Biotechnology and Food Safety 4-B, Samokatnaya str., Moscow, 111033, Russia E-mail: tehnohimkontrol@mail.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2834-2411
Борщева Юлия Александровна — кандидат технических наук, старший научный сотрудник, отдел биотехнологии ферментов, дрожжей, органических кислот и биологически-активных добавок, Всероссийский научно-исследовательский институт пищевой биотехнологии — филиал Федерального исследовательского центра питания, биотехнологии и безопасности пищи Россия, 111033, Москва, Самокатная ул., 4-Б E-mail: juliyaborshova@yandex.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0911-5325	**Yulia A. Borshcheva**, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Department of Biotechnology of Enzymes, Yeasts, Organic Acids and Dietary Supplements, All-Russian Scientific Research Institute of Food Biotechnology is a branch of the Federal Research Centre of Nutrition, Biotechnology and Food Safety 4-B, Samokatnaya str., Moscow, 111033, Russia E-mail: juliyaborshova@yandex.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0911-5325
Оверченко Марина Борисовна — кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, отдел биотехнологии ферментов, дрожжей, органических кислот и биологически-активных добавок, Всероссийский научно-исследовательский институт пищевой биотехнологии — филиал Федерального исследовательского центра питания, биотехнологии и безопасности пищи Россия, 111033, Москва, Самокатная ул., 4-Б E-mail: mb_over@mail.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0191-5897	**Marina B. Overchenko**, Candidate of Technical Sciences, Leading Researcher, Department of Biotechnology of Enzymes, Yeast, Organic Acids and Dietary Supplements, All-Russian Scientific Research Institute of Food Biotechnology is a branch of the Federal Research Centre of Nutrition, Biotechnology and Food Safety 4-B, Samokatnaya str., Moscow, 111033, Russia E-mail: mb_over@mail.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0191-5897
Критерии авторства	**Contribution**
Авторы в равных долях имеют отношение к написанию рукописи и одинаково несут ответственность за плагиат.	Authors equally relevant to the writing of the manuscript, and equally responsible for plagiarism.
Конфликт интересов	**Conflict of interest**
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.	The authors declare that there is no conflict of interest.

DOI: https://doi.org/10.21323/2618-9771-2026-9-2-241-246

Received 06.10.2025
Accepted in revised 25.05.2026
Accepted for publication 29.05.2026
© Shaykhieva K. I., Kraysman N. V., Shaikhiev I. G., 2026

Available online at https://www.fsjour.com/jour
Review article
Open access

THE USE OF TANGERINE PEEL AS A COMPONENT IN FOOD PRODUCTS

Karina I. Shaykhieva*, Natalia V. Kraysman, Ildar G. Shaikhiev
Kazan National Research Technological University, Kazan, Russian Federation

KEYWORDS:
tangerine peel, biologically active substances, food, component, sensory and nutritional properties

ABSTRACT
The information from global literature sources has been summarized regarding the use of ground mandarin peel in the formulation of various food products and beverages. Data on worldwide mandarin cultivation volumes are provided, along with the data on content of carbohydrates, dietary fibers, proteins, various acids, tannins, and ash. Additionally, data on the presence of certain phenolic compounds and monosaccharides in mandarin peel are included. The possibility of using mandarin peel powder due to its high content of dietary fiber and phenolic compounds with antioxidant activity in the formulation of various food products is substantiated. The effect of adding mandarin peel powder to bakery and confectionery products on the functional, baking, textural, antioxidant and sensory properties of wheat bread, grocery and confectionery products made from it has been demonstrated. Additionally, information is provided regarding the use of mandarin peel powder in formulations for the production of meat products (such as cutlets) and dairy products. Data are also presented on adding of mandarin peel powder and its extracts into various beverages and jams. It has been demonstrated that mandarin peel and pomace can be used for the production of both alcoholic and non-alcoholic drinks. It has been shown that adding the mandarin peel powder and its extracts into bakery, confectionery, meat and dairy products, as well as into the formulation of various alcoholic and non-alcoholic beverages, leads to an improvement in the nutritional, nutritious and sensory characteristics of various food products. A conclusion has been made about the prospects of mandarin peel powder as a valuable additive to food products.

Поступила 06.10.2025
Поступила после рецензирования 25.05.2026
Принята в печать 29.05.2026
© Шайхиева К. И., Крайсман Н. В., Шайхиев И. Г., 2026

https://www.fsjour.com/jour
Обзорная статья
Открытый доступ

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОЖУРЫ МАНДАРИНОВ В КАЧЕСТВЕ КОМПОНЕНТА РАЗЛИЧНЫХ ПРОДУКТОВ ПИТАНИЯ

Шайхиева К. И.*, Крайсман Н. В., Шайхиев И. Г.
Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань, Россия

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:
кожура мандаринов, биологически активные вещества, продукты питания, компонент, органолептические и питательные свойства

АННОТАЦИЯ
Обобщены сведения из мировых литературных источников по использованию измельченной кожуры мандарина в рецептуре различных продуктов питания и напитков. Приведены данные по объемам выращивания мандаринов в мире, а также по содержанию углеводов, пищевых волокон, протеинов, различных кислот, таннинов, зольного вещества. Также приведены данные по содержанию некоторых фенольных соединений и моносахаридов в составе кожуры плодов мандаринов. Обоснована возможность использования порошка из кожуры мандаринов ввиду высокого содержание пищевых волокон и фенольных соединений с антиоксидантной активностью в рецептуре различных продуктов питания. Показано влияние добавления порошка кожуры мандаринов в хлебобулочные и кондитерские изделия на функциональные, хлебопекарные, текстурные, антиоксидантные и органолептические свойства пшеничного хлеба, бакалейных и кондитерских изделий из него. Также приведены сведения по использованию порошка из кожуры мандаринов в рецептурах для изготовления мясных (таких как котлеты) и молочных продуктов питания. Приведены сведения по использованию порошка из кожуры мандаринов и экстрактов из него в составе различных напитков и джемов. Показано, что кожура и выжимки мандаринов могут быть использованы для получения алкогольных и безалкогольных напитков. Показано, что введение порошка из кожуры мандарина, а также экстрактов из него в хлебобулочные, кондитерские, мясные и молочные продукты, а также в рецептуру различных алкогольных и безалкогольных напитков приводит к улучшению нутрициологических, питательных и органолептических характеристик различных продуктов питания. Сделан вывод о перспективах порошка мандариновой кожуры как ценной добавки в продукты питания.

1. Introduction

The citrus fruits are the world's third largest cultivated crops after bananas and apples. Citrus trees are widespread commercial garden fruit trees cultivated in industrial scale in the countries with a suitable climate; their fruits (hesperidia) are valued for their palatable characteristics. There are a large number of citrus species of which oranges, lemons, tangerines (also in equal degree called as mandarins), grapefruits, pomelo, etc. which are widely used for human consumption [1]. Tangerines rank second in terms of fructification among citrus fruits, after oranges. The latter have the advantage of the ease of separating the peel from the pulp compared to the fruits of other citrus.

The total gross harvest of tangerines in recent years (the 2025 season) has exceeded 38,14 mln. tons [2]. China is the world's main producer accounting for 27.10 mln. tons, followed by the European Union (2.794 mln. tons), Turkey (2.186 mln. tons), Morocco (1.150 mln. tons), the United States (0.997 mln. tons) and South Africa (1.0 mln. tons) [2].

The fruits of tangerines are mainly used in the food industry for human consumption [3]. Tangerine pulp is also used to make a variety of beverages including juices, jams, marmalades, candied fruits, and other foods. Tangerine pulp separation results in several mln tons of peel generated globally every year [3]. Most of tangerine peel is irrecoverably lost, thus ending up in solid waste landfills, where its rotting contributes to the release of greenhouse gases into the atmosphere.

Recently, the application of fruit and vegetable wastes in various foods has been developing on the global scale [4–13].

It has been determined that tangerine peel is a source of a large number of valuable chemical compounds. Thus, it was determined that raw tangerine peel contains carbohydrates — 80.1±2.87%, dietary fiber —

FOR CITATION: **Shaykhieva, K. I., Kraysman, N. V., Shaihiev, I. G.** (2026). The use of tangerine peel as a component in food products. *Food Systems,* 9(2), 241–246. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2026-9-2-241-246

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: **Шайхиева, К. И., Крайсман, Н. В., Шайхиев, И. Г.** (2026). Использование кожуры мандаринов в качестве компонента различных продуктов питания. *Пищевые системы*, 9(2), 241–246. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2026-9-2-241-246

7.21±0.03%, proteins — 4.39±0.02%, various acids — 3.36±0.05%, carotenoids — 2143±25.24 μg/g, tannins — 2±0.2 mg/kg, ascorbic acid-28±1.94 mg/100 g; ash content — 4.92±0.03% [14]. In addition, tangerine peel has been found to contain various polyphenolic compounds [15], polysaccharides [16], and essential oils [17].

Phenolic compounds in citrus peel mainly include phenolic acids, mainly caffeic, *p*-coumaric, ferulic and sinapic, flavonones (naringin and hesperidin) and polymethoxylated flavones (nebiletin and tangeretin). It was found that citrus peel contains more of these compounds than the edible parts of fruits [15]. It was determined that the content of ferulic, p-coumaric, sinapic, caffeic, *p*-hydroxybenzoic, vanillin, and protocatechoic acids in *satsuma* variety of mandarin (*Citrus unshiu* Marc.) peel extracts obtained by 10 minutes' 8W ultrasound treatment at 30 °C amounted to 1513.2, 140.8, 132.7, 64.2, 34.1, 34.1, and 15.8 μg/g of dry matter, respectively [15]. At the same time, the total content of gallic acid, hydroxybenzoic acid, vanillic acid, coumaric acid and ferulic acid in *kinnow* variety of mandarin (*Citrus reticulata Var. kinnow*) peel extracts after microwave exposure was 175.22, 72.19, 316.69, 830.27, and 2386.0 μg/g, respectively [18]. The main polyphenolic compounds found in mandarin peel extracts were hesperidin, naringin, tangeridine, and rutin, which accounted for almost 86% of the total amount of extracted phenols [19–21]. Monosaccharides content in *ponkan* variety of mandarin (*Citrus reticulata Blanco cv.Ponkan*) peel hot water extract was found to be as follows: arabinose — 17.7%, mannose — 1.8%, galactose — 17.6%, glucose — 2.9%, rhamnose — 2.7%. The content of uronic acids, proteins, and phenolic compounds was 57.3% [16]. At the same time, Zhang et al. [22] states that the content of arabinose in mandarin peel is 27.5–40.6%, galactose — 4.1–18.5%, rhamnose — 6.2–11.7%, xylose — 10.4%, glucose — 8.9% of the total sugars count. The pectin extracted from tangerine peel showed a total phenolic content of 41.2±1.67 mg GAE/g of pectin. The equivalent weight of pectin was 1950.31±2.78 g/mol, and the content of methoxyls was 11.47±1.21% [23].

Citrus peel including the peel of tangerines contains essential oils with their composition depending on the fruit ripeness, the storage conditions and the extraction method [24]. It contains 85–99% volatile and 1–15% non-volatile components [25]. Citrus peel oil consists of ~97% monoterpenes, alcohols and aldehydes. Esters make up 1.8–2.8% [25]. Due to their excellent antifungal and antibacterial activity, as well as their antioxidant nature, essential oils are used in the preparation and storage of the products with improved storageability [26].

Based on the above, tangerine peel is obviously a valuable secondary material resource and a source of many biologically active substances [27–35]. Figure 1 shows the structure of a tangerine. Based on the above, tangerine peel is considered as a valuable secondary material resource containing biologically active substances and can be used in various food products to increase the nutritional value of the latter [36,37].

2. Objects and methods

The study consists of a detailed analysis of the world and domestic literature on application of crushed or ground peel of mandarin fruits as a component in various food products. The search for literary information was conducted in the Google scholar search engines for 2005–2025. Such a long period contributed to a deeper coverage of literary sources on the topic of the review. Data are provided on the volumes of mandarin cultivation on a global scale and the content of biologically active substances in the peel of the fruit. It is shown that the introduction of mandarin peel powder into various food products helps improving the nutritional, functional and sensory characteristics of food products. The use of mandarin peel and its pomace for the production of alcoholic and soft drinks is also described.

3. The use of tangerine peel in baked goods

Literary sources have found a number of articles about the use of tangerine peel powder (Figure 2) in baking recipes. It was determined that tangerine peel flour contains 34 volatile substances, mainly limonene (58–68%), γ-terpinene (18–22%), β-mercene (2.75–3.1%), terpinolene (1.33–5.36%), α-pinene (1.01–4.74%) and others, the content of which does not exceed 1% [39]. It is stated that tangerine peel flour has a nutrient content that allows its using in food products, since it features high content of dietary fiber and phenolic compounds along with antioxidant activity and is safe from the point of view of microbiological requirements throughout the entire period of use [40].

Thus, there was a study of the quality of sausage bread containing citrus (orange, lime, tangerine and lemon) peel in an amount of 3%. It was determined that sausage bread without citrus peel (control) and a sample with lime peel had the same maximum average score (8.3 points). The bread with tangerine and orange zest had the least score (8.1 points). Physico-chemical analysis data showed that the mass fraction of moisture ranged within 48.08–52.73%, dry matter mass fraction varied within 47.27–51.92%. The remaining quality indicators of the samples were within the normal range [41].

In [42] Kaur et al., *kinnow* peel powder (KPP) was used in a concentration of 0–3% (in terms of flour weight) as a functional ingredient to determine its effect on the functional, baking, textural, antioxidant, and sensory properties of wheat bread. It was found that KPP significantly ($P < 0.05$) reduced the final viscosity of the mixtures and at the same time increased the absorbency during baking by 60.10–67.01% and reduced the cooking loss during baking (14.30–11.16 g). The higher moisture binding and KPP fibers content also reduced the leavening property of bread which resulted in a gradual decrease in the specific volume of the loaf, while at the same time increasing the hardness of the bread crumb (5.41–9.39 N). The presence of biologically active compounds in the powder increased the total content of phenols (16.93–45.21 mg GAE/100 g), flavonoids (4.71–42.53 mg QE/100 g), carotenoids (2.90–6.71 mg/100 g) in bread, and enhanced its antioxidant activity. Experimental bread crumb showed increased lightness and yellowness. Bread with addition of 2% KPP powder showed the best sensory properties and functional characteristics [42].

The nutritional, process, functional, and sensory properties of soup sticks enriched with freeze-dried *kinnow* peel powder (KPP) were also studied. It was determined that an increase in the level of wheat flour substitution with KPP from 0 to 9% resulted a significant increase in ash content, viscoelasticity, tensile strength, yellowness, baking aptitude and storage stability, as well as a decrease in content of moisture, crude protein, crude fat, gelatination degree parameters. In addition, KPP enriched soup sticks showed a longer digestion time compared to that of the control samples and the analysis of the appearance and structure showed a reduction in pores size. Stability analysis during baking and storage revealed the enrichment of soup stick with added KPP with polyphenols. Sensory evaluation showed that an increase in the substitution level had a positive effect on the flavor and color intensity, but worsened the taste [43].

In addition to tangerine peel flour powder, there was a study of the effect of the latter's extracts in wheat bread. Thus, the control bread sample and the sample of wheat bread enriched with 2% and 4% (by weight/volume) tangerine peel extract were analyzed for antioxidant activity and

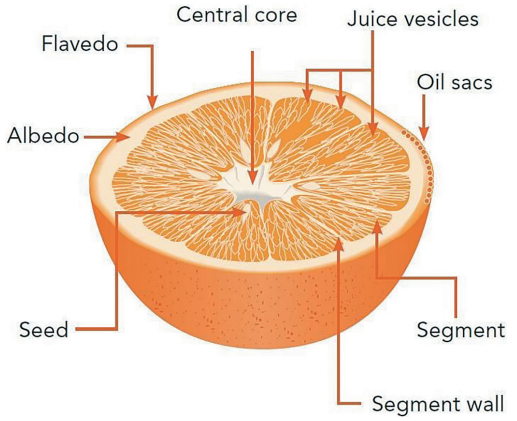


Figure 1. **Cross-section of a mandarin [38]**
Рисунок 1. **Плод мандарина в поперечном разрезе [38]**



Figure 2. **The appearance of mandarin peel powder [40]**
Рисунок 2. **Внешний вид порошка кожуры мандарина [40]**

phenolic composition. Besides, *in vitro* digestion results showed a significant increase in the total content of flavonoids (2.2±0.1 mg/g), antioxidant activity (IC_{50} = 37±4 mg/g), and the content of quercetin, caffeic acid and hesperidin in the 4% extract-enriched bread. It was revealed that most polyphenols were completely decomposed after *in vitro* digestion process, except for hesperidin (159±36 μg/g), which indicates an increase in the antioxidant potential of bread [44].

4. The use of tangerine peel in biscuits

There are several articles in the international literature about using tangerine peel powder in biscuits recipes [45–55]. Thus, in particular, tangerine peel powder was used in the production of semi-sweet biscuits made from hard dough by replacing wheat flour by 3–9% of tangerine peel powder to ensure the quality and acceptability of the food product. It was found that the thickness of the biscuits increased during baking, while the width and spread ratio of the biscuits decreased along with an increase in the tangerine peel powder content in the biscuit. It was determined that biscuits containing 6% of the peel were comparable to the control sample. The content of fiber, ash, ascorbic acid, carotenoids, polyphenols, and antioxidant activity was found to be 0.85%, 1.32%, 1.5 mg/100 g, 69 μg/g, 2150 μg of gallic acid equivalent (GAE)/g, and 24.5%, respectively, which was significantly higher than that of the control sample of the biscuit [46].

Choi in [47], tangerine peel powder was added to biscuits dough in amount of 1–7%. It was found that the density of biscuit dough, the rate of loss and leavening of biscuits tended to decrease with an increase in the amount of the tangerine peel powder added. The pH of the biscuit dough, moisture content, distribution coefficient, and the lightness of the biscuits decreased, and the redness and yellowness of the biscuits increased significantly along with an increase in the content of tangerine peel powder. The phenolic compounds content and the activity of DPPH-ABTS+ in removing radicals by biscuits increased depending on the amount of citrus peel powder addition. Based on sensory evaluation, biscuits with 3% tangerine peel ranked first in appearance, texture, and overall preference be the consumers [47].

It was determined that tangerine peel powder has high antioxidant activity and phenolic compounds when added in the amount of 10% to biscuits. Enriching the crackers with 10% tangerine peel resulted in an increase in the sensory evaluation of the products. Crackers with tangerine peel showed an improvement in glucose levels, serum lipid profile, hepatic and renal function in experimental animals. The condition of pancreatic tissues in the experimental groups improved compared to the control group. It was concluded that crackers containing 10% tangerine peel powder had a high potential to increase nutritional value and protect against diabetes [48]. The antioxidant ability, oxidative and sensory stability of biscuits containing tangerine and orange peel powders were studied in [48].

In [49], banana and tangerine peels were finely ground and added to cupcakes and biscuits in concentrations of 3%, 5% and 8%. The samples were analyzed on the day of the cupcakes cooking, as well as after 1, 2, 3 and 5 days of storage. A comprehensive physico-chemical analysis demonstrated an improvement in nutritional and functional properties of the experimental samples compared to the control samples. In particular, the addition of peel powder provided an increase in energy value, improved nutritional qualities due to increasing the protein content (up to 12.8%), total fat (up to 7.84%), total carbohydrates (up to 11.4%), total ash (up to 76.9%), and total vitamin C content (up to 3.95 times). In addition, fruit peel powder acted as moisture binding agent by reducing moisture content and water activity, thus potentially extending the product's shelf life. Tangerine peel powder featured a more pronounced effect on the physicochemical characteristics compared with the banana peel powder. In addition, the inclusion of powder made of fruit peel significantly increased the levels of total polyphenols, flavonoids, and antioxidant activity, while the values were 2.7 times higher than in the control samples [49].

In [50], wheat flour was replaced with KPP in an amount of 0–15%. The variable recipe formulations were used to make biscuits. Sensory evaluation showed that the addition of KPP enhanced the aroma, taste and color of the food products. It was revealed that the addition of more than 10% of KPP powder to the formulation is unacceptable from the point of view of taste. However, the inclusion of the peel significantly increased the fiber and protein content, as well as the ash content of the biscuits. Hence it was concluded that the addition of KPP can enrich biscuits and have a positive effect on their nutritional and sensory qualities [50].

Tangerine peel powder was used to make madeleine biscuits by adding 0–40% of its mass fraction to flour. It was revealed that the weight and yield of the dough were the highest, and the loss rate was the lowest in the formulation containing 40% of the tangerine peel powder. The height and volume of the products tended to decrease while increasing the amount of tangerine peel powder added into the formulation. It was found that the biscuits became more bright with increasing the powder concentration, while the yellow and red colors were lowest in the control group and increased as the amount of powder dosage increased. It was determined that the total polyphenols and flavonoids in madeleine biscuits increased significantly as a result of increased amounts of the powder added. The madeleines antioxidant activity also increased with the addition of the powder in a dose-dependent manner. The appearance, aroma, texture, taste, and overall acceptability of the food products were highest with 20% tangerine peel powder added [51].

Kinnow peel dietary fiber produced by enzymatic extraction with the help of ultrasound was used in the formulation of biscuits. Water-retaining and oil-retaining properties and the ability to absorb fiber glucose were found to be equal to 8.17–9.24 g/g, 2.96–4.68.09 g/g and 1.56–2.28 mmol/g, respectively. It was shown that *kinnow* peel dietary fibers can be used to produce fiber-enriched foods. The extracted fibers were used to develop recipes of biscuits that showed good nutritional, sensory, and textural properties with an overall acceptability index 7.15–7.84 [52].

Kinnow peel and pomace and SFE (supercritical fluid extraction) phytochemicals from the peel were studied to prepare functional biscuits was investigated. Wheat flour was replaced with dried *kinnow* peel and pomace powder at a 5–20% substitution level, while extracted phytochemicals were added at a 1–4% substitution level. It was revealed that the enrichment of cookies with *kinnow* waste enhances their nutritional and nutraceutical potential. The inclusion of the phytochemical extract obtained by supercritical fluid extraction of *kinnow* peel allows the production of cookies via more potent bioactive methods than the plain inclusion of *kinnow* peel powder. Natural polyphenols in *kinnow* peel composition have shown excellent ability to improve the shelf life of fortified cookies. The results of researches have shown that cookies prepared with 10% peel, 5% pomace and 4% phytochemicals received the best sensory ratings [53].

5. The use of tangerine peel for making cupcakes and other confectioneries

Along with cookies, tangerine peel powder has also been explored in cupcake recipes [54–61]. In particular, the effect of KPP blanching duration on its physicochemical characteristics and its suitability for cupcake recipes was investigated. Blanching was carried out at 95 °C for 2–8 minutes. It was revealed that with increase of blanching duration pH, bulk density, water absorption index and oil absorption capacity increased and were 6.32, 7.05 g/cm^3, 4.98 g/g and 2.04 g/g, accordingly. It was also determined that increasing the blanching duration had a positive effect on the organoleptic properties and reduced the bitter taste of the KPP. The best consumer properties were observed in cupcakes with 20% of the KPP added that had been blanched for 8 minutes [56]. Except of blanching duration, effect of particles size onto dough and cupcake parameters was researched. The characteristic of KPP with particle sizes of <180 μm, 180–250 μm and 250–500 μm showed that the particle size of KPP less than 180 μm has higher bulk density, color, oil absorption ability, water solubility and lower water retention capacity. The total phenolic, flavonoid and antioxidant properties of KPP varied within the range 10.1–10.9 mg GAE/g, 4.96–6.09 mg QE/g and 77.5–87.2%, respectively. Increasing the particle size increased the pasting and thermal properties of the dough. The highest dough pasting viscosity (1069±2 cP) and pasting temperature (75.3 °C) were observed for the KPP with the largest particle size. KPP were introduced into the recipe of cupcakes in the amount of 5–20% instead of wheat flour. It was found that the increase in the content of KPP in the muffins led to a decrease in volume, color parameters and an increase in hardness. The most sensory and nutritional characteristics were found with the introduction of 5% of KPP into the recipe of the food product [57].

Tangerine peel powder, tomato pulp, and wheat bran were included in the recipe of cupcakes consisting of soy (25%) and wheat (75%) flour, in the ratio of 1:4:8. It was determined that the products had a low acceptability index (68.44%). The composition of the product was determined as follows: protein content — 15.75%, fatty acids — 23.55%, dietary fiber — 13.5%, carbohydrates — 18.6%, ash content — 2.27% and moisture — 26.42%. It was determined that the food products possessed high antioxidant activity [58].

As well KPP was used to make candies with a long shelf life. In laboratory studies, KPP was processed in nine different ways. The resulting candies were analyzed for their physicochemical and organoleptic properties at intervals of 15 days during 45 days period. The results showed increases in content of crude fiber, total soluble dry matters, pH, reducing sugars, total dry matter and total sugar content as a result of storage. Simultaneously decrease in ash content, moisture, titratable acidity, ascorbic acid content, tannins, antioxidant activity, total phenol content, carotenoids

and pectin content was recorded. It was found that the best processing was the method that included repeated boiling, cooking in a 75% sugar syrup solution and leaving in sugar syrup for 24 hours for saturation. The products had the desired approximate physicochemical and organoleptic properties and were stable for at least 45 days of storage [59].

KPP and other ingredients were used for production of nutrition bars. The recipe contained 37% banana pomace flour, 25% of jaggery, 25% of banana peel powder, 10% of KPP and 3% of glycerin. It was determined that the nutritional bar according to the developed recipe had an energy value similar to the commercial bar with low protein and fat content. However, it had more crude fiber (15.14 g/100 g) and minerals such as Ca, K, Fe, Cu and Zn, which could provide 9.5, 29, 40, 18 and 6% of the recommended daily intake, respectively [60].

In the work [60], the sensory and mechanical characteristics, moisture and color indicators of the traditional Korean rice cake "Sulgidduk" with the addition of tangerine peel powder in an amount of 1–4% were analyzed. It was found that the texture of Sulgidduk with the addition of tangerine peel powder, its hardness, elasticity, cohesion and stickiness increased, while stickiness and chewiness had no significant difference. The moisture content of Sulgidduk with mandarin peel powder varied from 37% to 39%. The L value of color decreased along with the increase of mandarin peel powder; however, the *a* value and *b* value of color increased along with the increase of mandarin peel powder added. According to sensory evaluation, the sample with 3% added mandarin powder had the highest values of color and moisture [61].

Conclusion was made about the advisability of using powders of fruit and vegetable pomace as stabilizing additives for fat systems based on vegetable oil, including the production of confectionery emulsions [62].

In work [64], the interaction between fruit powders, the extrusion process, the physical properties and the nutritional quality of the resulting product was studied. The control sample, which included 30% of wheat flour, 25% of corn starch, 25% of potato starch and 20% of dry milk powder, was supplemented with 11% of fruit powder, including tangerine peel. It was found that the addition of fruit powder significantly ($P < 0.05$) affected the expansion and density of extrudates. The content of soluble and insoluble fibers increases significantly after the extrusion process, while antioxidant levels decrease. It was noted that the resulting products (snacks) feature an improved nutritional profile compared to other extruded snacks due to low content of fat and sugar and being a good source of fiber [63].

6. Use of tangerine peel powder in meat and dairy products

Tangerine peel powder was used in recipes for the production of meat and dairy products. Thus, in work [64], the optimal amounts of *Crataegi* fructus flour and dried tangerine peel flour were determined for adding to raw bean flour in a sauce for pork cutlets. By increasing the content of *Crataegi* fructus flour and dried mandarin peel flour in the receipt, the pH value and salinity of the samples decreased, and the DPPH free radical scavenging activity increased. The L value of the samples was 33.37–42.28, the *a* and *b* values did not demonstrate constant trend of behavior. As the content of *Crataegi* fructus flour and dried tangerine peel flour in the receipt increased, the viscosity of the samples increased also. Based on sensory evaluation results, 50–75% of samples received high scores for appearance, taste, color, softness, thickness, and overall acceptability. In conclusion, based on sensory quality and antioxidant properties, the optimal pork cutlet sauce consisted of 50–75% hawthorn fruit flour and dried mandarin peel flour added to raw bean flour [64].

In [65], beef patties were treated with extracts from grape seeds and mandarin pomace at a dosage of 450 μg/g, and compared with control samples for their effect on color, lipid and protein oxidation, and bacterial growth under simulated retail conditions (4 °C) for 9 days, as well as sensory characteristics. It was found that the retail display period had a significant impact on all parameters of the shelf life of cutlets. Overall, the intensity of aroma and taste in beef cutlets was highest in samples containing mandarin pomace extract. The results showed that the extracts could be commercially evaluated as natural antioxidants and antibacterial agents in beef patties [65].

Some physicochemical, microbiological and sensory properties of ice cream produced with addition of essential oils obtained from lemon, tangerine and orange peel in various proportions (0.1%, 0.3% and 0.5%) were investigated. It was found that the pH and acidity values of the samples varied from pH = 6.36–6.45 and 0.22–0.27, respectively. At the end of the study, the lowest total counts of aerobic mesophilic bacteria (3.80 log CFU/g), psychrophilic bacteria (4.01 log CFU/g), yeasts and molds (3.71 log CFU/g) and *Pseudomonas spp*. (2.04 log CFU/g) were detected in the ice cream sample containing orange peel extract. It was found that *coliform* bacteria, *Salmonella* spp., *Staphylococcus aureus, Escherichia coli* and *Listeria* monocytogenes were not detected in any of the ice cream samples. As a result of the sensory evaluation, it was found that the least preferred sample was the control ice cream sample [66].

7. The use of tangerine peel powder in various drinks and jams

As it has been mentioned above, tangerine peel contains essential oil with limonene as the dominant compound, which can be used as a flavoring agent and source of antioxidants in foods. In the work [67], the composition of the recipe, sensory and chemical characteristics of vegetable jam with the addition of encapsulated powder and extract from tangerine peel were determined. The factors used in this study were the type of active substance and the proportion of maltodextrin and gum arabic added in ratios of 1:3–3:1. It was found that the most acceptable is vegetable jam with the addition of encapsulated essential oil extract with a proportion of maltodextrin and gum Arabic in ratio 2:3. It was reported that the sensory assessment for color was 3.67 points, for aroma — 3.53 points, for taste — 3.0 points, and for spreadability — 4.53 points. The water content in the product was 77.32%, the antioxidant activity was 7.75%, the beta-carotene content was 15017.99 μg/100 g, and the total fiber content was 0.62% [67].

Mandarin peel extract was also incorporated into the jam formulation at concentrations ranging from 0.5% to 2.5%. It was observed that the addition of mandarin peel extract at various concentrations significantly influenced the aroma, flavor, and overall preference, but did not significantly affect the color characteristics or lubricity properties of the food product. It was determined that adding 2% of extract to the jam recipe gave the best results for the sensory properties of the jam compared to the control samples. An increase in antioxidant activity from 12.21 to 16.01% was recorded. The product has a color intensity of L — 43.30; a — 3.00; b — 37.03, water content — 58.61%, water activity — 0.73; pH — 3.5 and microorganism content — 3.7×10^3 CFU/g [68]. In addition to jams, the use of mandarin peel is recommended for the production of liqueurs via maceration [69].

Mandarin peel was also used to produce mandarin peel liqueur with three alcohol bases (grain alcohol, sugar cane alcohol and mandarin alcohol). It was determined that the alcohol content was 18.84°, 20.01°, and 19.67° g/l, respectively. Sensory analysis tests were conducted to evaluate the following attributes: alcoholic taste, fruity aroma, sweetness, and overall impression. Grain alcohol-based liqueur showed the highest average value for all attributes (6.32, 6.66, 6.34 and 6.26 points, respectively) [70].

Some food processing wastes (banana, pomegranate, tangerine, eggplant and red onion peels, as well as walnut shells, cherry stems and corn stalks) were used in various compositions and ratios to prepare herbal teas. Three new mixtures were infused at different temperatures (70 and 100 °C) and durations (3, 4 and 5 min). Significant effects of different temperatures and brewing duration on tea color were also demonstrated. Mandarin peel was included in all three herbal mixtures. It was noted that the use of these components in alternative teas may be attractive to the consumers and industrial producers due to their availability and high bioactivity [71].

In the work [72], the protective effect of dry powder based on mandarin peel, hawthorn and *Pueraria lobate* was studied in mice with acute alcoholic liver damage. The optimal process for powder preparation involved soaking three herbs for 30 minutes and performing double extraction. The first solid-liquid ratio was 1 : 12 and the duration of extraction was 2.0 h, and the second was 1 : 10 and the duration of extraction was 1.5 h. Subsequently, the two extracts were combined. After concentration, drying, and grinding, a dry paste-like powder was obtained, which was mixed with maltodextrin in a 1:1 ratio, 1.0% of mogroside and 90% of ethanol were added as wetting agent to enable wet granulation. It was determined that the composite powder made from the extracts has a uniform color, good solubility, moderate sweetness and delicate taste, and also possessed a good hepatoprotective effect in cases of acute alcoholic liver damage [72].

8. Conclusion

Adding mandarin peel powder to various food products, such as bakery products, confectionery, meat and dairy products, helps to improve significantly their nutritional, nutritious and sensory characteristics. The use of this natural component allows enriching food products with vitamins, minerals and biologically active substances, which enriching, in most cases, increases their nutritional value and benefits for the human health. The review also examines the effect of adding tangerine peel powder on the shelf life of the food products and their expiration dates. In most cases, an extension of these parameters was observed.

The above considerations open the new prospects for the utilization of citrus processing wastes in the food industry, thus contributing to the

development of innovative technologies and the expansion of the range of natural food products. Generally, results of the study confirm the promising potential of using mandarin peel as an environmentally friendly and functional ingredient, which can contribute to the improvement of food product quality and which meets the demands of the modern consumers for healthy nutrition.

REFERENCES/БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Hamid, S., Sharma, K., Kumar, K., Thakur, A. (2024). Types and cultivation of citrus fruits. Chapter in a book: Citrus Fruits and Juice. Singapore: Springer, 2024. https://doi.org/10.1007/978-981-99-8699-6_2
2. USDA (2022). Citrus: World Markets and Trade. USDA Foreign Agricultural Service. Global Market Analysis, 2022. Retrieved from https://apps.fas.usda.gov/psdonline/circulars/citrus.pdf Accessed May 11, 2026
3. Kumar, H., Bhardwaj, K., Sharma, R., Nepovimova, E., Kuča, K., Dhanjal, D.S. et al. (2020). Fruit and vegetable peels: Utilization of high value horticultural waste in novel industrial applications. *Molecules*, 25(12), Article 2812. https://doi.org/10.3390/molecules
4. Gowe, C. (2015). Review on potential use of fruit and vegetables by-products as a valuable source of natural food additives. *Food Science and Quality Management*, 45(1), 47–61.
5. Zhu, Y., Luan, Y., Zhao, Y., Liu J., Duan, Z., Ruan, R. (2023). Current technologies and uses for fruit and vegetable wastes in a sustainable system: A review. *Foods,* 12(10), Article 1949. https://doi.org/10.3390/foods12101949
6. Ganesh, K.S., Sridhar, A., Vishali, S. (2022). Utilization of fruit and vegetable waste to produce value-added products: Conventional utilization and emerging opportunities — A review. *Chemosphere*, 287(Pt 3), Article 132221. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132221
7. Augustin, M.A., Sanguansri, L., Fox, E.M., Cobiac, L., Cole, M.B. (2020). Recovery of wasted fruit and vegetables for improving sustainable diets. *Trends in Food Science and Technology*, 95, 75–85. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.11.010
8. Râpă, M., Darie-Niță, R.N., Coman, G. (2024). Valorization of fruit and vegetable waste into sustainable and value-added materials. *Waste*, 2(3), 258–278. https://doi.org/10.3390/waste2030015
9. Ueda, J.M., Pedrosa, M.C., Heleno, S.A., Carocho, M., Ferreira, I.C.F.R., Barros, L. (2022). Food additives from fruit and vegetable by-products and bio-residues: A comprehensive review focused on sustainability. *Sustainability*, 14(9), Article 5212. https://doi.org/10.3390/su14095212
10. Dilucia, F., Lacivita, V., Conte, A., Del Nobile, M.A. (2020). Sustainable use of fruit and vegetable by-products to enhance food packaging performance. *Foods*, 9(7), Article 857. https://doi.org/10.3390/foods9070857
11. Ratu, R.N., Velescu, I.D., Stoica, F., Usturoi, A., Arsenoaia, V.N., Crivei, I.C. et al (2023). Application of agri-food by-products in the food industry. *Agriculture*, 13, Article 1559. https://doi.org/10.3390/agriculture13081559
12. Ronie, M.E., Aziz, A.H.A., Kobun, R., Pindi, W., Roslan, J., Putra, N.R. et al. (2024). Unveiling the potential applications of plant by-products in food — A review. *Waste Management Bulletin*, 2(2), 183–203. https://doi.org/10.1016/j.wmb.2024.07.008
13. Marcillo-Parra, V., Tupuna-Yerovi, D.S., González, Z., Ruales, J. (2021). Encapsulation of bioactive compounds from fruit and vegetable by-products for food application — A review. *Trends in Food Science and Technology*, 116, 11–23. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.07.009
14. Ojha, P., Karki, T.B., Sitaula, R. (2016). Physio-chemical and functional quality evaluation of mandarin peel powder. *Journal of Agriculture Science and Technology*, 18, 575–582.
15. Singh, B., Singh, J.P., Kaur, A., Singh, N. (2020). Phenolic composition, antioxidant potential and health benefits of citrus peel. *Food Research International*, 132, Article 109114. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109114
16. Colodel, C., Vriesmann, L.C., de Oliveira Petkowicz, C.L. (2018). Cell wall polysaccharides from Ponkan mandarin (*Citrus reticulata* Blanco *cv. Ponkan*) peel. *Carbohydrate Polymers*, 195, 120–127. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.04.066
17. Kamaliroosta, L., Zolfaghari, M., Shafiee, S., Larijani, K., Zojaji, M. (2016). Chemical identifications of citrus peels essential oils. *Journal of Food Biosciences and Technology*, 6(2), 69–76.
18. Hayat, K., Hussain, S., Abbas, S., Farooq, U., Ding, B., Xia, S. et al. (2009). Optimized microwave-assisted extraction of phenolic acids from citrus mandarin peels and evaluation of antioxidant activity *in vitro*. *Separation and Purification Technology*, 70(1), 63–70. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2009.08.012
19. Ferreira, S.S., Silva, A.M., Nunes, F.M. (2018). *Citrus reticulata* Blanco peels as a source of antioxidant and anti-proliferative phenolic compounds. *Industrial Crops and Products*, 111, 141–148. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.10.009
20. Chen, X.M., Tait, A.R., Kitts, D.D. (2017). Flavonoid composition of orange peel and its association with antioxidant and anti-inflammatory activities. *Food Chemistry*, 218, 15–21. http://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.09.016
21. Zhang, H., Cui, J., Tian, G., DiMarco-Crook, C., Gao, W., Zhao, C. et al. (2019). Efficiency of four different dietary preparation methods in extracting functional compounds from dried tangerine peel. *Food Chemistry*, 28, 340–350. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.03.063
22. Zhang, H., Chen, J., Li, J., Yan, L., Li, S., Ye, X. et al. (2018). Extraction and characterization of RG-I enriched pectic polysaccharides from mandarin citrus peel. *Food Hydrocolloids*, 79, 579–586. https://doi.org/10.1016/J.foodhyd.2017.12.002
23. Benmebarek, I.E., Gonzalez-Serrano, D.J., Aghababaei, F., Ziogkas, D., Garcia-Cruz, R., Boukhari, A. et al. (2024). Optimizing the microwave-assisted hydrothermal extraction of pectin from tangerine by-product and its physicochemical, structural, and functional properties. *Food Chemistry: X,* 23, Article 101615. https://doi.org/10.1016/j.fochx.2024.101615
24. Bousbia, N., Vian, M.A., Ferhat, M.A., Meklati, B., Chemat, F. (2009). A new process for extraction of essential oil from *Citrus* peels: Microwave hydrodiffusion and gravity. *Journal of Food Engineering*, 90(3), 409–413. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2008.06.034
25. Sajid, A., Sarfraz, R.A., Hanif, M.A., Shahid, M. (2016). Evaluation of chemical composition and biological activities of *Citrus pseudolimon* and *Citrus grandis* peel essential oils. *Journal of Chemical Society of Pakistan*, 38(2), 266–273.
26. Mandal S., Mandal M. (2016). Mandarin (*Citrus reticulata* L. var.) oils. Chapter in a book: Essential oils in food preservation, flavor and safety. Academic Press, 2016. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-416641-7.00091-2
27. Šafranko, S., Šubarić, D., Jerković, I., Jokić, S. (2023). Citrus by-products as a valuable source of biologically active compounds with promising pharmaceutical, biological and biomedical potential. *Pharmaceuticals*, 16(8), Article 1081. https://doi.org/10.3390/ph16081081
28. Faustino, M., Veiga, M., Sousa, P., Costa, E.M., Silva, S., Pintado, M. (2019). Agro-food byproducts as a new source of natural food additives. *Molecules*, 24(6), Article 1056. https://doi.org/10.3390/molecules24061056
29. Chavan, P., Singh, A.K., Kaur, G. (2018). Recent progress in the utilization of industrial waste and by-products of citrus fruits: A review. *Journal of Food Process Engineering*, 41(8), Article e12895. https://doi.org/10.1111/jfpe.12895
30. Satari, B., Karimi, K. (2018). Citrus processing wastes: Environmental impacts, recent advances, and future perspectives in total valorization. *Resources, Conservation and Recycling*, 129(Part C), 153–167. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.10.032
31. Suri, S., Singh, A., Nema, P.K. (2022). Current applications of citrus fruit processing waste: A scientific outlook. *Applied Food Research*, 2(1), Article 100050. https://doi.org/10.1016/j.afres.2022.100050
32. Sharma, K., Mahato, N., Cho, M.H., Lee, Y. R. (2017). Converting citrus wastes into value-added products: Economic and environmently friendly approaches. *Nutrition*, 34, 29–46. https://doi.org/10.1016/j.nut.2016.09.006
33. Leporini, M., Tundis, R., Sicari, V., Loizzo, M.R. (2021). Citrus species: Modern functional food and nutraceutical-based product ingredient. *Italian Journal of Food Science*, 33(2), 63–107. https://doi.org/10.15586/ijfs.v33i2.2009
34. Rafiq, S., Kaul, R., Sofi, S.A., Bashir, N., Nazir, F., Nayik, G.A. (2018). Citrus peel as a source of functional ingredient: A review. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 17(4), 351–358. https://doi.org/10.1016/j.jssas.2016.07.006
35. Chaudhary, N., Dangi, P. (2022). Fruit and vegetable waste: A taste of future foods. Chapter in a book: Edible Food Packaging. https://doi.org/10.1007/978-981-16-2383-7_6
36. Sabry, B.A., Badr, A.N., Mohammed, D.M., Desoukey, M.A., Farouk, A. (2024). Validating the protective role of orange and tangerine peel extracts foramending food safety against microorganisms' contamination using molecular docking. *Heliyon*, 10(6), Article e27737. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e27737
37. Pérez-Jiménez, J., Saura-Calixto, F. (2018). Fruit peels as sources of non-extractable polyphenols or macromolecular antioxidants: Analysis and nutritional implications. *Food Research International*, 111, 148–152. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.05.023
38. Adeniyi, A.G., Abdulkareem, S.A., Iwuozor, K.O., Ogunniyi, S., Abdulkareem, M.T., Emenike, E.C. et al (2022). Effect of salt impregnation on the properties of orange albedo biochar. *Cleaner Chemical Engineering*, 3, Article 100059. https://doi.org/10.1016/j.clce.2022.100059
39. Galvan-Lima, Â., Cunha, S.C., Martins, Z. E., Soares, A.G., Ferreira, I.M.P.L.V.O., Farah, A. (2021). Headspace volatolome of peel flours from citrus fruits grown in Brazil. *Food Research International*, 150(Part A), Article 110801. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2021.110801
40. Ramos, S. A., de Oliveira, L.F., Silva, M.R., Capobiango, M. (2023). Reaproveitamento de resíduos alimentares: Desenvolvimento e caracterização de farinha de casca de tangerina (*Citrus reticulata*). *Scientia Plena*, 19(4), Article 041501. [Ramos, S. A., de Oliveira, L.F., Silva, M.R., Capobiango, M. (2023). Reuse of food residues: Development and characterization of tangerine peel flour (*Citrus reticulata*). *Scientia Plena*, 19(4), Article 041501. (In Portuguese)] https://doi.org/10.14808/sci.plena.2023.041501
41. Романова, Т.Н. (11 ноября 2021). *Влияние цедры цитрусовых культур на качество колбасного хлеба.* Материалы всероссийской (национальной) научно-практическойконференции с международным участием «Актуальные вопросы агропромышленного комплекса в России и за рубежом». Молодёжный: Иркутский ГАУ, 2021. [Romanova, T. N. (November 11, 2021). *Effect of addition of citrus zest on the quality of sausage bread.*Materials of All-Russian (national) Scientific and Practical Conference with involvement of international participants "The current issues of the agro-industrial complex in Russia and abroad". Molodezniy: Irkutsk State Agrarian University, 2021. (In Russian)]
42. Kaur, S., Sachdev, P.A., Singh, A., Surasani, V.K.R. (2023). Utilisation of *Kinnow* peel as a functional ingredient in bread: Physicochemical, functional, textural and sensory attributes. *International Journal of Food Science and Technology,* 58(5), 2706–2714. https://doi.org/10.1111/ijfs.16040
43. Rafiq, S., Sofi, S.A., Kaul, R., Dar, B.N. (2022). Effect of freeze-dried kinnow peel powder incorporation on nutritional, quality characteristics, baking, sensorial properties, and storage stability of traditional wheat-based soup sticks. *Journal of Food Processing and Preservation,* 46(7), Article e16652. https://doi.org/10.1111/jfpp.16652
44. Gómez-Mejía, E., Sacristán, I., Rosales-Conrado, N., León-González, M.E., Madrid, Y. (2023). Valorization of *Citrus reticulata* Blanco peels to produce enriched wheat bread: Phenolic bioaccessibility and antioxidant potential. *Antioxidants*, 12(9), Article 1742. https://doi.org/10.3390/antiox12091742
45. Kang, J.H., Chung, C. H. (2020). Quality characteristics of madeleine with added Citrus mandarin peel powder. *Culinary Science and Hospitality Research*, 26(1), 135–145. (In Korean)

46. Ojha, P., Thapa, S. (2017). Quality evaluation of biscuit incorporated with mandarin peel powder. *Chemistry and Chemical Engineering, Biotechnology, Food Industry*, 18(1), 19–30.
47. Choi, J.-H. (2021). Antioxidant activity and quality characteristics of cookies prepared with citrus peels powder. *Culinary Science and Hospitality Research*, 27(8), 77–86. (In Korean)
48. Shalaby, H.S., El-Sayed, H. (2020). Conceivable effect of feeding crackers containing peas and tangerine peels on rats with diabetes induced by alloxan. *Bulletin of the National Nutrition Institute of the Arab Republic of Egypt*, 56(2), 1–38. https://doi.org/10.21608/bnni.2020.172489
49. Hoxha, L., Mestani, M., Nuha, D., Bytyçi, P., Durmishi, B. (2024). Sustainable applications of cereal-based products through the utilisation of fruit waste. *Zywność. Nauka. Technologia. Jakość*, 31(2(139)), 174–198. https://doi.org/10.15193/zntj/2024/139/502
50. Kakkar, S., Tandon, R., Tandon, N. (2023). Chemical profiling and identification of phytochemicals from microwave-assisted extract of kinnow peel using LC–MS and its fortification in biscuits. *Annals of Agri-Bio Research*, 28(1), 1–6.
51. Yoon, J.A. (2024). Quality characteristics and antioxidant activity of madeleines with added citrus peel powder. *Journal of the East Asian Society of Dietary Life*, 34(4), 249–261. https://doi.org/10.17495/easdl.2024.8.34.4.249 (In Korean)
52. Kaur, S., Panesar, P.S., Chopra, H.K. (2023). Extraction of dietary fiber from kinnow (*Citrus reticulata*) peels using sequential ultrasonic and enzymatic treatments and its application in development of cookies. *Food Bioscience*, 54, Article 102891. https://doi.org/10.1016/j.fbio.2023.102891
53. Yaqoob, M., Aggarwal, P., Rasool, N., Baba, W.N., Ahluwalia, P., Abdelrahman, R. (2021). Enhanced functional properties and shelf stability of cookies by fortification of kinnow derived phytochemicals and residues. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 15, 2369–2376. https://doi.org/10.1007/s11694-021-00827-8
54. Youssef, M. (2023). Utilization of some citrus peels in formulating functional cookies and pasta. *Alexandria Journal of Food Science and Technology*, 21(2), 21–32. https://doi.org/10.21608/ajfs.2023.333292
55. Abdelwahab, A.S., Abuelazid, A. (2018). Bioactive compounds in some citrus peels influenced by drying processes and quality evaluation of cakes supplemented with citrus peel powder. *Journal of Advances in Agricultural Research*, 23(1), 44–67.
56. Kalyani, K., Bhati, D., Maurya, D., Tyagi, D.B. (2024). Impact of blanching treatments on the physicochemical qualities of kinnow peel powder and its utilization for cupcake formulation. *Asian Journal of Dairy and Food Research*, 43(1), 136–141. https://doi.org/10.18805/ajdfr.DR-2064
57. Khaleel, G., Sharanagat, V.S., Singh, L., Kumar, Y., Kumar, K., Kishore, A. et al. (2022). Characterization of kinnow (citrus reticulate) peel and its effect on the quality of muffin. *Journal of Food Processing and Preservation*, 46(12), Article e16716. https://doi.org/10.1111/jfpp.16716
58. Dhillon, P.K., Tanwar, B. (2018). Muffins incorporated with multiple blend functional ingredients: Development, sensory evaluation, proximate composition and total antioxidant activity. *Journal of Agricultural Engineering and Food Technology*, 5(3), 122–126.
59. Kaur, H., Singh, G., Kaushik, R., Wani, A.W. (2024). Utilization of Kinnow peel for candy production: A study on quality attributes and storage stability. *Journal of Applied and Natural Science*, 16(2), 854–864. https://doi.org/10.31018/jans.v16i2.5626
60. Fazil, C., Kumar, Y., Sharma, R., Srivastava, T., Saxena, D.C. (2024). Valorization of banana and kinnow waste in the development of nutritional bar using extrusion and plate-molding technique. *Waste and Biomass Valorization*, 15(1), 57–73. https://doi.org/10.1007/s12649-023-02133-4
61. Ahn, G.J., Lee, Y.J. (2014). Quality characteristics of Sulgidduk with different amounts of dried tangerine peel powder. *Korean Journal of Food and Cookery Science*, 30(3), 284–290. http://doi.org/10.9724/kfcs.2014.30.3.284
62. Румянцева, В.В., Гурова, А.Ю. (2012). Исследование технологических свойств порошков выжимок плодоовощного сырья. *Технология и товароведение инновационных пищевых продуктов*, 1(12), 10–14. [Rumyantseva, V.V., Gurova, A.Yu. (2012). Research of process properties of powders made of fruit and vegetables raw materials pomace. *Technology and Merchandising of the Innovative Foodstuff,* 1(12), 10–14. (In Russian)]
63. Potter, R., Stojceska, V., Plunkett, A. (2013). The use of fruit powders in extruded snacks suitable for Children's diets. *LWT-Food Science and Technology*, 51(2), 537–544. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2012.11.015
64. Chae, K.Y. (2016). Quality characteristics of pork cutlet sauce by the addition Crataegi Fructus flour and dried tangerine peel flour. *Foodservice Industry Journal*, 12(3), 127–138. https://doi.org/10.22509/kfsa.2016.12.3.009
65. Bambeni, T., Tayengwa, T., Chikwanha, O.C., Manley, M., Gouws, P.A., Marais, J. et al. (2021). Biopreservative efficacy of grape (*Vitis vinifera*) and clementine mandarin orange (*Citrus reticulata*) by-product extracts in raw ground beef patties. *Meat Science*, 181, Article 108609. https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2021.108609
66. Tomar, O., Akarca, G. (2019). Effects of ice cream produced with Lemon, mandarin, and orange peel essential oils on some physicochemical, microbiological and sensorial properties. *Kocatepe Veterinary Journal*, 12(1), 62–70. https://doi.org/10.30607/kvj.499415
67. Angelina, G., Tyastiningrum, E., Sitorus, E.M., Aini, N. (2021). Enkapsulasi serbuk simplisia dan ekstrak kulit jeruk serta aplikasinya pada vegetables jam. *Jurnal Agroteknologi*, 15(2), 166–181. https://doi.org/10.19184/j-agt.v15i02.27358 (In Indonesian)
68. Tyastiningrum, E., Aimi, N. (2023). Adding mandarin orange peel extract to the vegetable jam's attributes. *Agritekno: Jurnal Teknologi Pertanian*, 12(1), 65–74. https://doi.org/10.30598/jagritekno.2023.12.1.65 (In Indonesian)
69. Sheffield, W J., Thompson, H.O. (1954). The preparation and evaluation of tangerine peel tincture and tangerine syrup. *Journal of the American Pharmaceutical Association*, 43(3), 181–185. https://doi.org/10.1002/jps.3030430318
70. Viana, L.F., Munhoz, C.L., Souza, A.R.M., Santana, L.M., Maciel, V., Caliari, M. (2011). Development and characterization of the tangerine peel liquor with different alcoholic bases. *Acta Scientiarum Technology*, 33(1), 95–100. https://doi.org/10.4025/actascitechnol.v33i1.7873
71. Acar, A., Aydın, M., Arslan, D. (2022). Development of infusion tea formulations with food wastes: Evaluation of temperature and time effects on quality parameters. *Applied Food Research*, 2(1), Article 100087. https://doi.org/10.1016/j.afres.2022.100087
72. Lei, C., Zhu, L., Zhu, L., Ou, F., Mao, Y., Fu, F. (2024). Preparation technology of tangerine peel composite solid beverage and its protective effect on mice with acute alcoholic liver injury. *Food and Machinery*, 40(7), 132–140. https://doi.org/10.13652/j.spjx.1003.5788.2024.80386 (In Japanese)

AUTHOR INFORMATION	СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ
Affiliation	**Принадлежность к организации**
Karina I. Shaykhieva, Candidate of Technical Sciences, Docent, Engineering Ecology Department, Kazan National Research Technological University. 68, K. Marx str., 420015, Kazan, Russia E-mail: shaykhievak@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1188-7885 * corresponding author	**Шайхиева Карина Ильдаровна** — кандидат технических наук, доцент, кафедра инженерной экологии, Казанский национальный исследовательский технологический университет 420015, Казань, ул. Карла Маркса, 68 E-mail: shaykhievak@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1188-7885 * автор для контактов
Natalia V. Kraysman, Candidate of Historical Sciences, Docent, Docent, Department of the Foreign Languages for Professional Communication, Kazan National Research Technological University 68, K. Marx str. 420015, Kazan, Russia E-mail: n_kraysman@mail.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5573-4664	**Крайсман Наталья Владимировна** — кандидат исторических наук, доцент, доцент, кафедра иностранных языков в профессиональной коммуникации, Казанский национальный исследовательский технологический университет 420015, Казань, ул. Карла Маркса, 68 E-mail: n_kraysman@mail.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5573-4664
Ildar G. Shaikhiev, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor, Engineering Ecology Department, Kazan National Research Technological University 68, K. Marx str. 420015, Kazan, Russia E-mail: ildars@inbox.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9160-0412	**Шайхиев Ильдар Гильманович** — доктор технических наук, профессор, профессор, кафедра инженерной экологии, Казанский национальный исследовательский технологический университет 420015, Казань, ул. Карла Маркса, 68 E-mail: ildars@inbox.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9160-0412

Contribution	Критерии авторства
Karina I. Shaykhieva — Preparation, creation and/or presentation of the published work, substantive translation. **Natalia V. Kraysman** — Preparation, creation and/or presentation of the published work, substantive translation. **Ildar G. Shaikhiev** — Preparation, creation and/or presentation of the published work, critical review of article.	**Шайхиева К. И.** — Создание и подготовка рукописи, перевод на иностранный язык. **Крайсман Н. В.** — Создание и подготовка рукописи, перевод на иностранный язык. **Шайхиев И. Г.** — Создание и подготовка рукописи, критический анализ черновика рукописи.
Conflict of interest	**Конфликт интересов**
The authors declare no conflict of interest.	Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

DOI: https://doi.org/10.21323/2618-9771-2026-9-2-247-253

Поступила 14.02.2026
Поступила после рецензирования 26.05.2026
Принята в печать 29.05.2026
© Ковалёв К. А., Неповинных Н. В., 2026
https://www.fsjour.com/jour
Обзорная статья
Открытый доступ

ПРИМЕНЕНИЕ МИЦЕЛИАЛЬНОГО ГРИБА *ASPERGILLUS ORYZAE* В ПИЩЕВОЙ БИОТЕХНОЛОГИИ

Ковалёв К. А.[1], Неповинных Н. В.[1,2*]

[1] Астраханский государственный технический университет, Астрахань, Россия
[2] Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н. И. Вавилова, Саратов, Россия

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:
Aspergillus oryzae, кодзи, ферментация, пищевая биотехнология, безопасность

АННОТАЦИЯ

Aspergillus oryzae (*A. oryzae*) является одним из наиболее востребованных микроорганизмов в пищевой биотехнологии благодаря высокой секреторной активности, генетической стабильности и отсутствию токсигенности. На протяжении тысячелетий этот гриб использовался в странах Восточной Азии для ферментации пищевых продуктов, включая сакэ, мисо, соевый соус и мирин. В последние десятилетия *A. oryzae* привлекает значительное внимание исследователей из-за своей способности продуцировать широкий спектр ферментов и вторичных метаболитов, применяемых в пищевой, фармацевтической, кормовой и химической промышленности. Настоящий обзор систематизирует современные данные о морфологии, физиологии и генетике мицелиального гриба *A. oryzae*. Подчеркивает его особенности, обеспечивающие эффективность в различных технологических процессах. Рассматриваются основные группы ферментов, синтезируемых грибом, по способности продуцировать протеазы, амилазы, липазы, целлюлазы и пектиназы. Его роль велика в переработке сырья и формировании органолептических характеристик готовых продуктов. Особое внимание уделено геномным исследованиям, которые раскрывают механизмы одомашнивания *A. oryzae*. Рассмотрены его эволюционные связи с токсигенными видами рода *Aspergillus* и мутации, ответственные за отсутствие афлатоксигенности. В работе обсуждаются оптимальные условия культивирования гриба, включая параметры твердой и глубинной ферментации, а также возможности использования *A. oryzae* в устойчивых производственных системах, ориентированных на переработку сельскохозяйственных отходов. Описаны современные тенденции в области синтетической и метаболической инженерии, направленные на создание высокопродуктивных штаммов и расширение биотехнологического потенциала гриба. Обзор подчеркивает значимость *A. oryzae* как надежного и перспективного инструмента для разработки инновационных пищевых технологий и биопродуктов нового поколения.

Received 14.02.2026
Accepted in revised 26.05. 2026
Accepted for publication 29.05.2026
© Kovalev K. A., Nepovinnykh N. V., 2026
Available online at https://www.fsjour.com/jour
Review article
Open access

APPLICATION OF THE MYCELIAL FUNGUS *ASPERGILLUS ORYZAE* IN FOOD BIOTECHNOLOGY

Kirill A. Kovalev[1], Nataliia V. Nepovinnykh[1,2*]

[1] Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russia
[2] Saratov State University of Genetics, Biotechnology and Engineering named after N. I. Vavilov, Saratov, Russia

KEYWORDS:
Aspergillus oryzae, koji, fermentation, food biotechnology, safety

ABSTRACT

Aspergillus oryzae (*A. oryzae*) is one of the most widely used microorganisms in food biotechnology due to its high secretory capacity, genetic stability, and lack of toxigenicity. For thousands of years, this fungus has been utilized in East Asian countries for the fermentation of food products, including sake, miso, soy sauce, and mirin. In recent decades, *A. oryzae* has attracted significant attention from researchers due to its ability to produce a wide range of enzymes and secondary metabolites used in the food, pharmaceutical, feed, and chemical industries. The present review systematizes current data on the morphology, physiology, and genetics of *A. oryzae*, highlighting its unique features that ensure efficiency in various technological processes. The main groups of enzymes synthesized by the fungus are considered in terms of their ability to produce proteases, amylases, lipases, cellulases, and pectinases. These enzymes play a crucial role in raw material processing and in the formation of the organoleptic properties of final products. Special attention is paid to genomic studies that reveal the mechanisms of *A. oryzae* domestication, its evolutionary relationships with toxigenic species of the genus *Aspergillus*, and the presence of mutations responsible for the absence of aflatoxin production. Optimal cultivation conditions of the fungus are discussed, including parameters of solid-state and submerged fermentation. The potential use of *A. oryzae* in sustainable production systems focused on the utilization of agricultural waste is also highlighted. Current trends in synthetic and metabolic engineering aimed at the development of high-performance strains and the expansion of the biotechnological potential of the fungus are described. The review emphasizes the importance of *A. oryzae* as a reliable and promising tool for the development of innovative food technologies and next-generation bioproducts.

1. Введение

В настоящее время основное внимание уделяется поиску новых источников продовольствия. Это обуславливается ростом мирового населения и необходимостью обеспечения людей питательными, экологически безопасными и доступными продуктами. Для обеспечения продовольственной безопасности ведутся исследования новых источников пищи. Одна из перспективных стратегий — ферментация съедобных нитевидных грибов, которая позволяет производить питательные и доступные продукты питания с минимальным воздействием на окружающую среду [1].

A. oryzae особенно востребован в пищевой промышленности, где применяется для создания ферментированных продуктов, таких как мисо (соевая паста), соевый соус (сёя), солодовый рис (танэдзи), ферментированные и соленые черные соевые бобы (доу), соевый творог и уксус. Это обусловлено высокой биосинтетической способностью гриба по отношению к амилазам и протеазам, катализирующим

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: **Ковалёв, К. А., Неповинных, Н. В.** (2026). Применение мицелиального гриба *Aspergillus oryzae* в пищевой биотехнологии. *Пищевые системы*, 9(2), 247–253. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2026-9-2-247-253

FOR CITATION: Kovalev, K. A., Nepovinnykh, N. V. (2026). Application of the mycelial fungus *Aspergillus oryzae* in food biotechnology. *Food Systems,* 9(2), 247–253. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2026-9-2-247-253

гидролиз крахмальных и белковых полимеров продовольственного сырья [2].

Съедобные нитевидные грибы производят разнообразные ферменты, которые позволяют им расти на различных субстратах и образовывать грибную биомассу, богатую питательными веществами. Однако предстоит оценить полный потенциал этих грибов как новых источников пищи. Плесневые грибы могут не только повышать питательную ценность субстратов, но и улучшать биодоступность и усвоение питательных веществ в организме человека, благодаря синтезу витаминов, снижению уровня антипитательных соединений и преобразованию аминокислот и липидов [3].

Грибная биомасса, получаемая в ходе ферментации, удовлетворяет основные потребности в питательных веществах и служит ценным источником биологически активных веществ, таких как антиоксиданты, минералы, полиненасыщенные жирные кислоты и клетчатка (например, β-глюканы), которые способствуют улучшению здоровья и снижают риск развития ряда заболеваний [4,5]. Благодаря улучшенному питательному составу, продукты, полученные в процессе грибной ферментации, считаются функциональными [6].

Уже более двух тысячелетий *A. oryzae* используется для производства коджи в Азии. В Европе *A. oryzae* используется с начала прошлого века в производстве ферментов для пивоварения и выпечки [7].

Коджи — термин, используемый в Японии для обозначения риса или ячменя, инокулированных грибом *A. oryzae* — разновидность плесневого гриба, развивающегося на вареных зернах в теплой и влажной среде. Под термином «коджи» понимаются как инокулированные зерна, так и сами грибки и их споры. Гифы Aspergillus разрастаются в сеть, образуя видимые структуры по мере роста. Когда микроскопические споры *A. oryzae* попадают на подходящий субстрат, например, вареный рис или ячмень, они начинают прорастать. Образуются гифы — тонкие белые грибковые клетки, которые напоминают корни. С течением времени эти клетки распространяются, проникая в зерна и создавая мицелий. Он полностью покрывает и связывает зерна. Этот процесс начинается с небольших пятен белого «пуха», который через два дня превращается в плотный белый слой. Получается «пирог» из заплесневелых зерен, известный как коджи. Уже через 24 часа он начинает источать приятный запах, напоминающий маракуйю и абрикос. Через сорок восемь часов коджи становится фруктовым, сладким и насыщенным вкусом «умами» [8,9].

A. oryzae проявляет ряд биологических свойств, которые делают его перспективным пробиотиком в области ветеринарии для животноводства [10].

Целью данного обзора является систематизация знаний об использовании *A. oryzae* в пищевой биотехнологии.

2. Объекты и методы

Объектами исследования являлись научные публикации, посвященные биологическим, генетическим и биотехнологическим особенностям мицелиального гриба *Aspergillus oryzae*, а также направлениям его применения в пищевой биотехнологии и смежных отраслях.

Систематический поиск научной литературы был проведен с использованием поисковых систем Web of Science, Scopus, PubMed, ScienceDirect, SpringerLink, Google Scholar, а также в российских научных ресурсах eLIBRARY.RU и CyberLeninka.

Поисковые запросы формировались с использованием ключевых слов на английском и русском языках и их комбинаций: *Aspergillus oryzae*, *koji*, *solid-state fermentation*, *submerged fermentation*, *enzymes*, *food biotechnology*, *secondary metabolites*, *genomics*, *domestication*, *mycotoxin safety*.

В обзор включались научные статьи и обзорные работы, соответствующие следующим критериям:

- ❑ публикация в рецензируемых научных журналах;
- ❑ наличие полного текста;
- ❑ соответствие тематике исследования;
- ❑ временной диапазон публикации — преимущественно с 2016 года (за исключением фундаментальных работ, имеющих высокую научную значимость);
- ❑ индексирование издания в международных базах данных (WoS, Scopus) либо наличие признанного научного статуса.

Из анализа исключались тезисы конференций, не рецензируемые источники, патенты, учебные пособия и популярные издания, не содержащие оригинальных научных данных или обобщений.

3. Морфология и классификация *Aspergillus oryzae*

A. oryzae относится к роду гриба *Aspergillus*, семейства *Trichocomaceae*, класса *Eurotiomycetes*. Впервые он был описан в 1859 году, после чего стал одним из наиболее изучаемых микроорганизмов в биотехнологии. *A. oryzae* представляет собой многоклеточный гриб, образующий ветвистые мицелии. Созревая, мицелий гриба развивает специализированные споры — конидии, которые отвечают за распространение и размножение гриба. Именно конидии могут быть использованы для обнаружения гриба в лабораториях. Отличительным признаком *A. oryzae* является отсутствие у него афлатоксинов. Это делает его безопасным для использования в пищевой промышленности. Представители рода *Aspergillus*, такие как *A. flavus*, не имеют такого преимущества [11,12].

Под микроскопом у *A. oryzae* возможно увидеть характерные сферические пузырьки, которые несут длинные цепочки конидий. Они отчетливо видны на субстрате, например, на рисе, в виде беловатых, пушистых нитей. Сферические пузырьки — конидиеносцы — чаще всего крупные, берут начало прямо из субстрата, отличаются шероховатой поверхностью. Сама конидиальная головка имеет радиальную структуру. Конидий отличается тем, что имеет форму шара, чуть уплощенную. Еще одним отличительным свойством и одновременно преимуществом является возможность *A. oryzae* развиваться на различных питательных средах. Например, на картофельно-декстрозном агаре он образует массивные колонии, характеризующиеся быстрым ростом, а на агаре Чапека после недели инкубации при температуре 25 °C диаметр колоний достигает 7–8 см. Цвет *A. oryzae* меняется в процессе роста от бледно-желтого до желтовато-зеленого. Также важно отметить, что разные штаммы могут иметь разные цвета мицелия. Гриб активно развивается и на агаре с солодовым экстрактом. В промышленности обычно используют следующие субстраты: рис, соя, пшеница, ячмень, подсолнечник, овощи. Оптимум условий роста находится в пределах температуры 32–36 °C (± 1 °C); выше температуры 44 °C рост прекращается. Наиболее благоприятный диапазон pH — 5,0–6,0, при этом прорастание возможно в гораздо более широких пределах pH — от 2,0 до 8,0 [13,14].

Помимо развитой секреторной системы, *A. oryzae* характеризуется способностью к синтезу широкого спектра вторичных метаболитов, включая терпены, кумарины, оксилипины и жирные кислоты. Состав выделяемых соединений во многом определяется условиями культивирования, что типично и для других микроорганизмов [15–17].

Продуцируемые *A. oryzae* метаболиты проявляют разнообразные биологические активности: противоопухолевую, цитотоксическую, противомикробную, гипотензивную и противовирусную. Так, изокумариновые соединения, синтезируемые в твердых культурах, демонстрируют умеренное ингибирующее действие на рост различных линий опухолевых клеток человека. Глиотоксин и аспирохлорин, относящиеся к группе гетеротетрациклических соединений, обладают выраженной антимикробной и противогрибковой активностью [18,19].

4. Гриб *Aspergillus oryzae* — эффективная платформа для биотехнологического синтеза промышленных ферментов

A. oryzae имеет высокую секреторную активность, адаптивность к различным субстратам для культивирования, в том числе способность развиваться на твердых субстратах и активно продуцировать ферменты. За счет этих качеств гриб перспективен для микробных платформ промышленного биокатализа [20].

Микробы как продуценты ферментов хорошо закрепились в современной промышленности. Они имеют ряд преимуществ: себестоимость, низкое энергопотребление, безопасность для человека и природы, стабильность процессов при соблюдении необходимых параметров. Отдельно нужно отметить возможность культивирования на твердых субстратах. Именно это помогает сочетать экономическую выгоду и экологическую устойчивость. Например, только аграрные отходы имеют огромный потенциал для использования в качестве субстратов, но помимо твердофазной культивации существует и способ глубинной ферментации. Грибные ферменты сами по себе очень ценны, так как гифальная организация их мицелия обеспечивает устойчивость к низкой активности воды (a_w = 0,5–0,6) и высоким осмотическим нагрузкам [21].

- ❑ **Протеазы** составляют около 60% мирового рынка ферментов [22]. Ферменты этой группы востребованы в пищевой, фармацевтической и биотехнологической индустрии. Протеазы *A. oryzae* отличаются высокой продуктивностью, внеклеточной локализацией и удобством выделения. Например, протеаза, полученная при глубинном культивировании гриба на пшеничных отрубях, использовалась для гидролиза соевого изолята, сывороточного и яичного белков, что усиливало их антиоксидантные свойства. Отдельное значение имеет пролилэндопептидаза — фермент, расщепляющий пролинсодержащие белки, такие как глютен; он рассматривается как средство пероральной терапии при целиакии [23].

- **Амилазы** (α-, β- и глюкоамилазы) применяются во множестве отраслей. Альфа-амилазы катализируют расщепление крахмала и его производных до мальтозы и глюкозы, что делает их незаменимыми в производстве продуктов питания. Глюкоамилазы востребованы при изготовлении сиропов и спирта. *A. oryzae* успешно продуцирует эти ферменты на различных агросубстратах — от пшеничных и рисовых отрубей до свекловичной мякоти и подсолнечного жмыха [24,25].
- **Липазы** (триацилглицерол-ацилгидролазы) катализируют гидролиз жиров до жирных кислот и глицерина. Они применяются в производстве масел, молочных продуктов, моющих средств, косметики и фармацевтических препаратов. В пищевой промышленности липазы ценятся за способность улучшать вкус и аромат сыра, йогурта и масла. Для их получения *A. oryzae* выращивали на лигноцеллюлозных материалах, включая солому, отруби и кукурузные початки [26,27].
- **Целлюлазы и пектиназы** расщепляют клеточные полисахариды растений — целлюлозу и пектин. *A. oryzae* эффективно синтезирует эти ферменты при росте на соевых остатках. Они находят применение в производстве кормов, текстиля, бумаги, биотоплива, а также в пищевой промышленности и очистке сточных вод [28].
- **β-галактозидаза** гидролизует лактозу на глюкозу и галактозу, что делает ее ключевым ферментом в производстве продуктов для людей с лактозной непереносимостью. Она также улучшает текстуру молочных изделий и предотвращает кристаллизацию сахаров в сгущенном и замороженном молоке [29].

5. Раннее использование и популяризация *Aspergillus oryzae*

Некоторые из наиболее совершенных технологий, существующих в мире, представляют собой биологические системы, сформированные в результате длительной эволюции и воздействия естественного отбора. Природные механизмы, накопленные за миллионы лет, служат неисчерпаемым источником вдохновения и открытий для современной науки [30].

Одним из древнейших микроорганизмов, используемых в биотехнологических процессах, является гриб *A. oryzae*. Согласно историческим данным, его применяли в восточноазиатских странах, преимущественно в Китае и Японии, более 2000 лет назад. Наиболее ранние свидетельства использования культур, подобных A. *oryzae*, связаны с производством ферментированных соевых продуктов и алкогольных напитков на основе риса [30].

В Японии этот гриб получил название «kōji-кин» (плесень kōji) и стал основным элементом традиционных технологий изготовления соевого соуса (shōyu), пасты мисо и рисового вина сакэ. Благодаря способности продуцировать широкий спектр ферментов — амилаз, протеаз и липаз — *A. oryzae* эффективно расщепляет крахмал и белки, что обеспечивает формирование характерных органолептических свойств и высокую питательную ценность готовой продукции [30].

Предполагается, что первые попытки целенаправленного использования коджи были предприняты в Китае около 2500 лет назад. Древние кулинары заметили, что зерна, пораженные определенной плесенью, придавали продуктам приятный сладковато-фруктовый вкус. Несмотря на риски, связанные с тем, что близкие родственные виды рода Aspergillus способны продуцировать афлатоксины — сильные канцерогены, *A. oryzae* безопасен и не синтезирует эти токсичные соединения [31].

Первое письменное упоминание о коджи встречается в китайском трактате «Чжоуские ритуалы» (около 300 г. до н.э.), где плесень упоминается под названием «цюй». Уже в последующие столетия цюй стал важным компонентом китайской пищевой технологии, а рецепты изготовления зерновых вин и бобовых паст закрепились в официальных источниках. К VIII веку н.э. технология коджи была заимствована Японией, где получила дальнейшее развитие [31].

В древней Японии рис оставался продуктом, доступным преимущественно аристократии, в то время как большая часть населения использовала в питании ячмень и другие зерновые. Соответственно, для производства коджи применялись различные виды зерна, что способствовало формированию региональных особенностей технологии культивирования *A. oryzae* [31].

Род *Aspergillus* был впервые описан итальянским микологом и священником Пьером Антонио Микели в 1729 году. Ученый отметил сходство формы спороношения гриба с литургическим предметом — кропилом (aspergillum), что и определило название рода. Видовое наименование *oryzae* происходит от латинского слова oryza — «рис», что отражает традиционную субстратную основу его выращивания. С развитием микробиологии в конце XIX — начале XX века начались систематические исследования *A. oryzae*. В 1895 году японский микробиолог К. Такахаси впервые описал морфологические характеристики гриба, а впоследствии *A. oryzae* был признан промышленно значимым микроорганизмом, став основой для разработки ферментных препаратов и биотехнологических процессов сноска [32].

6. Геномика и одомашнивание *Aspergillus oryzae*

Штаммы, относящиеся к виду *A. oryzae*, характеризуются значительной фенотипической и физиологической вариабельностью, проявляющейся, в частности, в различиях по окраске колоний, морфологии спороношения и спектру ферментативной активности. Несмотря на это, взаимосвязь между фенотипическими особенностями и генетической детерминацией отдельных признаков изучена недостаточно полно. Первое сообщение о полногеномном секвенировании штамма *A. oryzae* RIB40 было опубликовано японскими исследователями в 2005 году. Для расшифровки генома был использован метод случайного секвенирования фрагментов (shotgun-sequencing), позволивший реконструировать геномный набор размером около 37 Мб. Он включает восемь хромосом и 12 074 предсказанных гена, кодирующих белки длиной более 100 аминокислотных остатков [33,34].

Сравнительный геномный анализ *A. oryzae*, *A. fumigatus* и *A. nidulans* выявил, что геном *A. oryzae* превышает размеры геномов двух последних видов на 7–9 Мб, что составляет увеличение приблизительно на 34 % и 29 % соответственно. Эти дополнительные участки включают специфические для *A. oryzae* генные кластеры, преимущественно связанные с метаболизмом вторичных соединений и с адаптацией к технологическим условиям культивирования [35,36].

Ранее предполагалось, что гены, локализованные в недавно приобретенных геномных областях, демонстрируют низкую экспрессию в стандартных условиях и не участвуют напрямую в ферментационных процессах. Однако последующие исследования показали, что значительная часть этих уникальных генов кодирует секреторные гидролазы, белки стрессового ответа и ферменты вторичного метаболизма, играющие ключевую роль в адаптации клеток к изменяющимся условиям среды [37].

Результаты сравнительных геномных анализов свидетельствуют, что кодирующие области геномов *A. flavus* и *A. oryzae* демонстрируют около 99,5 % идентичности, что указывает на их чрезвычайную генетическую близость. Ранее различие между видами проводилось преимущественно по морфологическим характеристикам и токсигенности, однако современные исследования используют молекулярные методы дифференциации, основанные на полногеномном анализе однонуклеотидных полиморфизмов (SNP-анализ) [37].

В отличие от *A. flavus*, некоторые штаммы которого продуцируют афлатоксины и представляют потенциальную опасность для здоровья человека, *A. oryzae* является нетоксигенным видом. Примечательно, что в геноме отдельных штаммов *A. oryzae* выявлены полностью или частично сохраненные кластеры биосинтеза афлатоксинов, однако эти кластеры функционально неактивны, что подтверждает отсутствие у данного вида способности к синтезу токсинов [38].

Развитие технологий секвенирования третьего поколения (Third Generation Sequencing, TGS) позволило существенно повысить точность и полноту геномных сборок *A. oryzae* за счет получения длинных последовательностей считывания и минимизации числа ошибок при аннотации. По данным базы NCBI, на сегодняшний день опубликованы геномные последовательности примерно 10 штаммов *A. oryzae* с размерами от 35,42 до 41,16 Мб и содержанием GC-пар на уровне около 48 %. Несмотря на наличие детализированных геномных данных, степень функциональной аннотации остается ограниченной: из более чем 10 000 предсказанных генов лишь около 200 (1,7 %) прошли экспериментальную валидацию [38].

В последние годы значительное внимание уделяется проблеме одомашнивания микроорганизмов, в том числе *A. oryzae*, как объекту длительного искусственного отбора. Одомашнивание трактуется как процесс направленной селекции природных форм, в ходе которого формируются штаммы, адаптированные к антропогенным условиям и обладающие требуемыми технологическими свойствами [39].

В биотехнологии одомашнивание представляет собой механизм формирования высокопродуктивных продуцентов, способных эффективно усваивать специфические субстраты, выдерживать стрессовые нагрузки и синтезировать целевые метаболиты. Для *A. oryzae* ключевыми направлениями селекции являются увеличение скорости роста мицелия, повышение активности амилазы, улучшение ароматообразующих свойств и снижение продукции пигментов и токсинов. Недавние исследования, основанные на полногеномном секвенировании 82 промышленных штаммов *A. oryzae*, показали, что эволюция данного вида сопровождалась множественными внутривидовыми событиями рекомбинации между предковыми геномами

без признаков половой рекомбинации. Это указывает на то, что процесс одомашнивания *A. oryzae* протекал преимущественно за счет внутригеномных мутаций, перестроек и отборов, а не гибридизации [40].

Внутривидовые и межкладовые сравнительные анализы подтвердили, что эволюционное давление, обусловленное длительной искусственной селекцией, привело к накоплению несинонимичных замен, инделов и точечных мутаций, оказывающих избирательное влияние на гены, вовлеченные в первичный и вторичный метаболизм [40].

Таким образом, *A. oryzae* представляет собой пример микроорганизма, генетическая организация которого формировалась под воздействием как естественных эволюционных факторов, так и направленного антропогенного отбора. Комплексное изучение геномной архитектуры и механизмов адаптации этого вида имеет ключевое значение для разработки новых биотехнологических штаммов с заданными свойствами.

7. Безопасность и афлатоксигенность

Как было показано выше, *A. oryzae* и *A. sojae* не продуцируют афлатоксин. В этих видах биосинтетический путь афлатоксина не функционирует, это подтвердили многочисленные исследования. Идентифицированный в геноме *A. sojae* кластер генов, отвечающий за синтез афлатоксина, имеет протяженность около 70 килобаз. За счет нонсенс-мутации теряются 62 аминокислоты в С-концевой области, включая транскрипционно-активирующий домен, что отключает выработку афлатоксина [41,42].

Аналогичная мутация обнаружена у ряда штаммов *A. sojae*, выделенных из традиционного соевого соуса, ранее ошибочно идентифицированных как *A. oryzae*. Кроме того, ген pksA, кодирующий поликетидсинтазу, необходимую для синтеза ключевого промежуточного продукта афлатоксина, содержит преждевременный стоп-кодон, что делает синтез токсина невозможным даже при наличии функционального AflR [43].

Эти дефекты были подтверждены при анализе черновой последовательности генома штамма *A. sojae* NBRC4239 [44,45].

Недавние исследования из традиционного корейского ферментированного продукта мэчжу выявили 14 штаммов *A. sojae*. У двух из них, SMF127 и SMF131, обнаружены нонсенс-мутации в генах aflR и pksA. Одновременно эти штаммы демонстрировали высокую протеолитическую активность, что делает их пригодными для использования в качестве закваски при ферментации [46].

Примерно у половины промышленных штаммов *A. oryzae*, применяемых в производстве японских ферментированных продуктов, полностью отсутствует кластер генов биосинтеза афлатоксинов. Даже в случаях, когда кластер частично сохраняется, экспрессия гена aflR крайне низкая. Таким образом, у плесневых грибов кодзи реализуются несколько независимых механизмов блокировки биосинтеза афлатоксина, что обеспечивает высокий уровень безопасности конечной продукции [43].

8. Условия культивирования

Культивирование *A. oryzae* осуществляется в двух основных формах — твердой (solid-state fermentation, SSF) и жидкой (submerged fermentation, SmF).

Твердофазная ферментация (SSF) представляет собой традиционную форму выращивания, при которой гриб развивается на твердом субстрате без свободной жидкости (например, рис, пшеница, ячмень, соевые бобы). Такой тип культивирования используется при производстве коджи, соевых соусов и паст мисо. Преимуществами SSF являются высокая концентрация ферментов, низкая контаминация и близость к естественным условиям роста гриба [47].

Глубинное культивирование (SmF) применяется в промышленном производстве ферментов, где необходима высокая степень контроля параметров среды. В этом случае гриб выращивается в биореакторах объемом от 5 до 100 м³ с поддержанием оптимальных параметров — температуры 30–33 °C, pH 5,5–6,0, растворенного кислорода не менее 30 % насыщения и скорости перемешивания 300–500 об/мин. Для биосинтеза ферментов в жидких средах часто применяются углеродные источники, такие как глюкоза, мальтоза, декстрин, крахмал или кукурузный экстракт. В качестве источников азота используют пептон, дрожжевой экстракт, соевую или пшеничную муку. Добавление ионов кальция и магния способствует стабилизации ферментной активности, особенно при синтезе амилаз и протеаз [48].

Рост *A. oryzae* проходит несколько стадий: прорастание конидий, развитие мицелия, формирование спороношений и при определенных условиях накопление вторичных метаболитов. В промышленных процессах акцент делается на мицелиальной фазе, где наблюдается максимальная ферментативная активность. Кислородный режим оказывает существенное влияние на морфологию. При недостатке кислорода формируются плотные гранулы (пеллеты), что может снижать продуктивность за счет ограничения диффузии субстрата. Напротив, при избыточной аэрации наблюдается фрагментация мицелия и повышение вязкости среды. Поэтому выбор оптимальных условий перемешивания и подачи воздуха является ключевым фактором для поддержания стабильного роста и секреции ферментов [49].

Кроме того, на биосинтетическую активность *A. oryzae* влияет регуляция катаболической репрессии. При избытке простых сахаров (например, глюкозы) экспрессия ферментных генов снижается, что требует контролируемого дозирования источников углерода. В современных технологиях применяются пошаговые или непрерывные системы подачи субстрата для поддержания высокой активности продуцента. В промышленных условиях *A. oryzae* выращивают преимущественно в ферментерах с контролируемыми параметрами. Для стабилизации морфологии используют пеногасители на основе силиконов и эмульгаторов. Оптимизация процесса достигается посредством математического моделирования кинетики роста и управления параметрами биопроцесса в реальном времени (температура, pH, аэрация, скорость перемешивания). Современные биотехнологии активно развивают направления иммобилизации клеток и ферментов *A. oryzae*. Это позволяет повысить устойчивость биокатализатора, продлить его срок службы и сократить затраты на очистку продуктов [49].

9. Использование *Aspergillus oryzae* в пищевой биотехнологии

A. oryzae традиционно используется в производстве широкого спектра ферментированных пищевых продуктов, таких как сакэ (рисовое вино), соевый соус, паста мисо и мирин. Эти продукты занимают значительную долю рынка стран Восточной Азии и активно распространяются на мировом уровне. Они входят в повседневный рацион населения во многих странах. В азиатской культуре *A. oryzae* известен как «кодзи-плесень» (*kōji mold*), играющая ключевую роль в формировании вкусового профиля и аромата ферментированных продуктов [50].

9.1. Производство и характеристика кодзи-заквасок

Коммерческие закваски кодзи выпускаются преимущественно в виде спор *A. oryzae*, получаемых путем культивирования штаммов на пропаренном рисе, ячмене или пшеничных отрубях. После инкубации, направленной на усиленное спорообразование, споры высушиваются и извлекаются для дальнейшего использования. В зависимости от технологии, готовые закваски могут содержать как частицы зерновой основы, так и представлять собой очищенные споровые порошки. В их состав добавляются наполнители (крахмал, карбонат кальция) для стабилизации и равномерного распределения [51].

Кодзи, применяемый для производства сакэ, характеризуется высокой амилазной активностью, обеспечивающий эффективный гидролиз рисового крахмала до глюкозы. Для получения прозрачного сакэ особое значение имеет выбор штамма с минимальным образованием пигментов и низкой споруляцией, что предотвращает нежелательную окраску напитка [52,53].

9.2. Кодзи при производстве соевого соуса

Соевый соус представляет собой продукт ферментативного гидролиза соевых белков до свободных аминокислот. В этом процессе ключевую роль играет высокая протеазная активность кодзи, обеспечивающая расщепление белковых субстратов. Поэтому для данного направления подбираются штаммы *A. oryzae* или *A. sojae*, обладающие выраженной протеолитической активностью [54,55].

A. sojae известен также характерными морфологическими признаками — короткими конидиеносцами и спорами темно-зеленого оттенка. Компактная структура мицелия способствует лучшей аэрации субстрата, облегчая перемешивание массы и ускоряя ферментативные реакции [56].

9.3. Использование кодзи при производстве мисо

В производстве мисо основным продуцентом является *A. oryzae*, хотя *A. sojae* также используется в отдельных вариантах технологии. Для получения мисо подбираются штаммы с сбалансированной амилазной и протеазной активностью. В процессе ферментации требуется одновременный гидролиз как белковых, так и углеводных компонентов [57].

Соевые белки в ходе созревания мисо расщепляются с образованием аминокислот. Они ответственны за формирование вкуса умами, а крахмалы риса или ячменя подвергаются ферментативному превращению в глюкозу и мальтозу. Таким образом, ферментный профиль кодзи определяет не только скорость ферментации, но и органолептические свойства конечного продукта [58].

Разнообразие мисо-заквасок обусловлено региональными особенностями и технологическими вариациями — различиями в составе ингредиентов, концентрации соли и длительности созревания. В одном из исследований было выделено 94 изолята кодзи, используемых в мисо-производстве, из которых 92 принадлежали к *A. oryzae* и только 2 — к *A. sojae*, применявшемуся преимущественно при производстве соевого мисо [59,60].

9.4. Физиологические и технологические параметры штаммов кодзи

Свойства заквасок кодзи включают в себя параметры роста, интенсивность спорообразования, длину гиф, скорость ферментативного метаболизма, цвет и аромат субстрата. Эти характеристики можно условно разделить на две группы:

Технологические параметры, влияющие на обработку сырья и процесс получения кодзи (например, способность к росту на пропаренном зерне и склонность к комкованию мицелия).

Биохимические свойства, определяющие ферментативный потенциал и качество ферментации (активность амилаз, протеаз, липаз и др.).

Для соевого соуса предпочтительны штаммы с повышенной протеазной активностью и ускоренным спорообразованием, в то время как для мисо важен баланс амилазной и протеазной активности. В ряде работ отмечено, что амилазная активность кодзи превышает аналогичные показатели пивных дрожжей на 8%, а протеазная — примерно на 20%. Корреляция наблюдается между активностями разных типов ферментов внутри одного штамма, что отражает комплексную регуляцию ферментогенеза [61].

Эти свойства рассматриваются как результат длительного искусственного отбора культур, проводимого производителями мисо и сакэ для достижения оптимальных характеристик готовой продукции. Эволюция штаммов кодзи в процессе антропогенного отбора тесно связана с культурными и экономическими факторами, отражающими изменения пищевых предпочтений населения. Следует подчеркнуть, что качество кодзи не является единственным определяющим фактором качества мисо. На конечные характеристики продукта влияют также параметры обработки соевых бобов, соотношение ингредиентов, контроль условий ферментации и участие сопутствующей микробиоты — молочнокислых бактерий и дрожжей [61].

10. Инновации и новые разработки с применением *Aspergillus oryzae*

A. oryzae остается одним из наиболее перспективных микроорганизмов в современной промышленной биотехнологии благодаря сочетанию высокой секреционной способности, генетической стабильности и безопасности для человека. В последние годы этот вид стал модельным объектом для разработок в области синтетической и метаболической биологии, что позволяет использовать его как платформу для получения ценных биопродуктов нового поколения [62].

Одним из ключевых направлений является применение *A. oryzae* как шасси-организма в синтетической биологии. Благодаря хорошо изученному геному и развитым инструментам трансформации, данный гриб используется для гетерологичной экспрессии белков и метаболических путей, отсутствующих в природе. С помощью методов CRISPR/Cas9, TALEN и Agrobacterium-опосредованной трансформации создаются штаммы, способные синтезировать новые метаболиты, биополимеры и фармацевтически значимые соединения [63].

Особое внимание уделяется созданию штаммов-продуцентов редких природных веществ — поликетидов, терпеноидов, непептидных антибиотиков и других вторичных метаболитов, ранее недоступных для крупномасштабного производства. В перспективе это открывает возможности для синтеза новых биоактивных соединений с противоопухолевыми, антибактериальными и антиоксидантными свойствами. Современные исследования направлены на интеграцию данных транскриптомики, протеомики и метаболомики для построения системных моделей метаболизма *A. oryzae*. Эти модели позволяют прогнозировать и регулировать обмен веществ на клеточном уровне, оптимизируя пути синтеза целевых метаболитов. Использование алгоритмов машинного обучения для анализа метаболических сетей способствует выявлению «узких мест» биосинтеза и позволяет рационально проектировать штаммы с улучшенной производительностью и толерантностью к стрессовым условиям [64].

11. Тенденции и перспективы

Одним из приоритетных направлений дальнейших исследований является повышение устойчивости *A. oryzae* к экстремальным факторам среды — высоким температурам, колебаниям pH, осмотическому давлению и присутствию токсичных субстратов. Мутагенез и направленная эволюция позволяют получать варианты с улучшенными биокаталитическими характеристиками, что делает возможным их использование в различных технологических циклах, включая процессы при повышенных температурах или в условиях ограниченного водного потенциала [65].

Современные разработки ориентированы на переработку сельскохозяйственных и пищевых отходов с использованием *A. oryzae* в качестве биокатализатора. Гриб способен эффективно утилизировать лигноцеллюлозные и крахмалсодержащие материалы, превращая их в ферменты, органические кислоты и другие ценные продукты. Это направление активно развивается в контексте циркулярной экономики, направленной на минимизацию отходов и повышение ресурсной эффективности [66].

Применение *A. oryzae* в биоконверсии отходов способствует сокращению углеродного следа промышленных производств и формированию экологически безопасных технологий. Совмещение процессов ферментации и биоремедиации открывает новые возможности для очистки сточных вод и утилизации загрязнителей органического происхождения [67,68].

Помимо производства традиционных ферментированных соусов, *A. oryzae* активно используется при разработке новых функциональных и альтернативных белковых продуктов. В последние годы гриб применяется для получения микопротеина, ферментированных растительных аналогов мяса и продуктов с повышенной биодоступностью аминокислот. Ферментация с участием *A. oryzae* способствует улучшению текстурных характеристик, снижению антипитательных факторов и формированию сложного ароматического профиля, что делает его перспективным инструментом в разработке продуктов нового поколения [69].

Дополнительно современные исследования демонстрируют возможность использования *A. oryzae* для производства биоактивных пептидов, функциональных ингредиентов и ферментированных соусов с улучшенными антиоксидантными и гипотензивными свойствами. Это расширяет спектр применения гриба за пределы производства традиционных азиатских продуктов и формирует новую нишу функционального питания и устойчивых пищевых систем [70].

В условиях формирования циркулярной экономики особое значение приобретает разработка биотехнологических подходов к переработке побочных продуктов рыбной промышленности. Перспективным направлением является применение *A. oryzae* в управляемой ферментации белоксодержащих субстратов с целью получения высокоценного пищевого сырья. Выраженная протеолитическая активность гриба обеспечивает активный гидролиз мышечных белков и соединительной ткани, что повышает степень гидролиза, при этом происходит накопление активных аминокислот и низкомолекулярных пептидов. Все эти процессы формируют профиль «умами» вкуса [69].

12. Заключение

Многовековая история применения *A. oryzae* в ферментированных технологиях –свидетельство того, что потенциал этого гриба был распознан задолго до возникновения научной микробиологии. Сегодня, располагая данными полногеномного секвенирования, технологиями редактирования генома и системными моделями метаболизма, исследователи поняли, какой биотехнологический ресурс был освоен эмпирически тысячи лет назад.

Проведенный анализ показывает: уникальность *A. oryzae* определяется не каким-либо одним свойством, а совокупностью взаимообусловленных характеристик: высокой секреторной активностью, генетической пластичностью, отсутствием токсигенности и способностью эффективно колонизировать твердые субстраты. Эти сочетания обеспечивают грибу конкурентоспособность перед другими микробными платформами в различных отраслях биотехнологии.

С практической точки зрения перспективными представляются два направления. Первое — интеграция *A. oryzae* в системы переработки самых различных отходов, где гриб выступает как биокатализатор, превращающий малоценные субстраты и сырье в функциональные ингредиенты, продукты с высокой добавленной стоимостью. Второе — разработка высокопродуктивных штаммов методами метаболической инженерии с акцентом на управление катаболической репрессией и оптимизацию морфологии мицелия в биореакторных системах.

Важно изучать регуляторно-этические аспекты проблемы. Внедрение генетически модифицированных штаммов *A. oryzae* в пищевую промышленность требует разработки стандартизированных

протоколов безопасности и прозрачного мониторинга стабильности вносимых генетических конструкций. Исторически граница между «одомашненным» и «модифицированным» организмом в данном случае размыта. Это требует пристального внимания к исследуемой теме.

A. oryzae стоит рассматривать не как микроорганизм, а как отточенную биотехнологическую платформу, с помощью которой можно добиться больших результатов в циркулярной экономике и пищевых системах. Для этого необходимо выделить значительные ресурсы на изучение микроорганизмов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК/REFERENCES

1. Римарева, Л. В., Серба, Е. М., Оверченко, М. Б., Игнатова, Н. И. Кривова, А. Ю., Курбатова, Е. И. и др. (2018). Многоцелевое использование гриба *Aspergillus oryzae* как продуцента комплекса гидролитических ферментов. *Вестник российской сельскохозяйственной науки*, 5, 29–33. [Rimareva, L. V., Serba, E. M., Overchenko, M. B., Ignatova, N. I., Krivova, A. Y., Kurbatova, E. I. et al. (2018). Multipurpose utilization of the aspergillus oryzae fungus — the producer of the hydrolase complex. *Vestnik of the Russian Agricultural Science*, 5, 29–33. (In Russian)] https://doi.org/10.30850/vrsn/2018/5/29-33
2. Steensels, J., Gallone, B., Voordeckers, K., Verstrepen, K. J. (2019). Domestication of industrial microbes. *Current Biology*, 29(10), R381-R393. https://doi.org/10.1016/j.cub.2019.04.025
3. Серба Е. М., Римарева Л. В., Оверченко М. Б., Мочалина, П. Ю., Игнатова, Н. И., Соколова, Е. Н. (2018). Микробная биомасса — перспективный источник полноценного белка и полисахаридов. *Вопросы питания*, 87(S5), 235–236. [Serba, E. M., Rimareva, L. V., Overchenko, M. B., Mochalina, P. Yu., Ignatova, N. I., Sokolova, E. N. (2018). Microbial biomass — a promising source of complete protein and polysaccharides. *Voprosy Pitaniya [Problems of Nutrition]*, 87(S5), 235–236. (In Russian)] https://doi.org/10.24411/0042-8833-2018-10346
4. Alberti, F., Foster, G. D., Bailey, A. M. (2017). Natural products from filamentous fungi and production by heterologous expression. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 101(2), 493–500. https://doi.org/10.1007/s00253-016-8034-2
5. Filho, P. F. S., Nair, R. B., Andersson, D., Lennartsson, P. R., Taherzadeh, M. J. (2018). Vegan-mycoprotein concentrate from pea-processing industry byproduct using edible filamentous fungi. *Fungal Biology and Biotechnology*, 5, Article 5. https://doi.org/10.1186/s40694-018-0050-9
6. Cai, S., Wang, O., Wu, W., Zhu, S., Zhou, F., Ji, B. et al. (2012). Comparative study of the effects of solid-state fermentation with three filamentous fungi on the total phenolics content (TPC), flavonoids, and antioxidant activities of subfractions from oats (*Avena sativa* L.). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 60(1), 507–513. https://doi.org/10.1021/jf204163a
7. Gupta, S., Khandelwal, K. (2025). *Aspergillus oryzae*: Multifunctional powerhouse revolutionizing food industries and gut health. *International Journal of Fungi*, 2(1), 1–17. https://doi.org/10.20944/ijf/2025.06.191974
8. Kusumoto, K.-I., Yamagata, Y., Tazawa, R., Kitagawa, M., Kato, T., Isobe, K. et al. (2021). Japanese traditional *miso* and *koji* making. *Journal of Fungi*, 7, Article 579. https://doi.org/10.3390/jof7070579
9. Allwood, J. G., Wakeling, L. T., Bean, D. C. (2021). Fermentation and the microbial community of Japanese *koji* and *miso*: A review. *Journal of Food Science*, 86(6), 2194–2207. https://doi.org/10.1111/1750-3841.15773
10. Uwineza, C., Parchami, M., Bouzarjomehr, M., Taherzadeh, M. J., Mahboubi, A. (2024). Recent developments in the application of filamentous fungus *Aspergillus oryzae* in ruminant feed. *Animals*, 14(16), Article 2427. https://doi.org/10.3390/ani14162427
11. Lehmbeck, J., Andersen, B., Sáez-Sáez, J., Frisvad, J. C., Arnau, J. (2025). Mycotoxin-free *Aspergillus oryzae* strain lineage for alternative and novel protein production at industrial scale. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 109(1), Article 94. https://doi.org/10.1007/s00253-025-13482-6
12. Furukawa, T., Sakai, K., Suzuki, T., Tanaka, T., Kushiro, M., Kusumoto, K.-I. (2024). Comparative genome analysis of Japanese field-isolated *Aspergillus* for aflatoxin productivity and non-productivity. *Journal of Fungi*, 10(7), Article 459. https://doi.org/10.3390/jof10070459
13. Rousta, N., Hellwig, C., Wainaina, S., Lukitawesa, L., Agnihotri, S., Rousta, K. et al. (2021). Filamentous fungus *Aspergillus oryzae* for food: From submerged cultivation to fungal burgers and their sensory evaluation — A pilot study. *Foods*, 10(11), Article 2774. https://doi.org/10.3390/foods10112774
14. Jun, S.-C., Kim, Y.-K., Han, K.-H. (2022). Characterization of nonaflatoxigenic *Aspergillus flavus/oryzae* strains isolated from Korean traditional soybean Meju. *Mycobiology*, 50(6), 408–419. https://doi.org/10.1080/12298093.2022.2156139
15. Jiang, C., Ge, J., He, B., Zhang, Z., Hu, Z., Li, Y. et al. (2022). Transcriptomic analysis reveals *Aspergillus oryzae* responds to temperature stress by regulating sugar metabolism and lipid metabolism. *PLoS ONE*, 17(9), Article e0274394. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0274394
16. Ge, J., Zhang, Z., Li, Y., Hu, Z., He, B., Li, Y. et al. (2022). Inhibition of *AoAur*1 increases mycelial growth, hyphal fusion and improves physiological adaptation to high-temperature stress in *Aspergillus oryzae*. *Archives of Microbiology*, 204(8), Article 477. https://doi.org/10.1007/s00203-022-03075-6
17. Son, S. Y., Lee, S., Singh, D., Lee, N.-R., Lee, D.-Y., Lee, C. H. (2018). Comprehensive secondary metabolite profiling toward delineating the solid and submerged-state fermentation of *Aspergillus oryzae* KCCM 12698. *Frontiers in Microbiology*, 9, Article 1076. https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.01076
18. Singh, D., Lee, S., Lee, C. H. (2019). Fathoming *Aspergillus oryzae* metabolomes in formulated growth matrices. *Critical Reviews in Biotechnology*, 39(1), 35–49. https://doi.org/10.1080/07388551.2018.1490246
19. Серба, Е. М., Овченко, М. Б., Римарева, Л. В., Погоржельская, Н. С., Давыдкина, В. Е., Поляков, В. А. (2017). Скрининг активных популяций *Aspergillus oryzae* по способности синтезировать промышленно значимые метаболиты. *Микология и фитопатология*, 51(1), 47–53. [Serba, E. M., Overchenko, M. B., Rimareva, L. V., Pogorzhelskaya, N. S., Davydkina, V. E., Polyakov, V. A. (2017). Screening active population in fungus *Aspergillus oryzae* ability to synthesize industrially significant metabolites. *Mycology and Phytopathology*, 51(1), 47–53. (In Russian)]
20. Frisvad, J. C., Møller, L. L. H., Larsen, T. O., Kumar, R., Arnau, J. (2018). Safety of the fungal workhorses of industrial biotechnology: Update on the mycotoxin and secondary metabolite potential of *Aspergillus niger*, *Aspergillus oryzae*, and Trichoderma reesei. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 102(22), 9481–9515. https://doi.org/10.1007/s00253-018-9354-1
21. Serba, E. M., Tadzhibova, P. Yu., Rimareva, L. V., Overchenko, M. B., Ignatova, N. I., Volkova, G. S. (2021). Bioconversion of soy under the influence of *Aspergillus oryzae* strains producing hydrolytic enzymes. *Foods and Raw Materials*, 9(1), 52–58. https://doi.org/10.21603/2308-4057-2021-1-52-58
22. Daba, G. M., Mostafa, F. A., Elkhateeb, W. A. (2021). The ancient koji mold (*Aspergillus oryzae*) as a modern biotechnological tool. *Bioresources and Bioprocessing*, 8(1), Article 52. https://doi.org/10.1186/s40643-021-00408-z
23. Eugster, P. J., Salamin, K., Grouzmann, E., Monod, M. (2015). Production and characterization of two major *Aspergillus oryzae* secreted prolyl endopeptidases able to efficiently digest proline-rich peptides of gliadin. *Microbiology (Reading)*, 161(12), 2277–2288. https://doi.org/10.1099/mic.0.000198
24. Fadel, M., AbdEl-Halim, S., Sharada, H., Yehia, A., Ammar, M. (2020). Production of glucoamylase, α-amylase and cellulase by *Aspergillus oryzae* F-923 cultivated on wheat bran under solid state fermentation. *Journal of Advances in Biology and Biotechnology*, 23, 8–22. https://doi.org/10.9734/jabb/2020/v23i430149
25. Pratama, F., Rahardja, R. T., Rachmadi, A. R., Salam, W. Q., Kho, K., Adelie, A. et al. (2025). Optimizing mycoprotein production by *Aspergillus oryzae* using soy whey as a substrate. *Journal of Fungi*, 11, Article 349. https://doi.org/10.3390/jof11050349
26. Ahmed, A., Badar, R., Khalique, N. (2019). Screening and optimization of submerged fermentation of lipolytic *Aspergillus oryzae*. *BioResources*, 14(4), 7664–7674. https://doi.org/10.15376/biores.14.4.7664-7674
27. Gholami-Shabani, M., Shams-Ghahfarokhi, M., Jamzivar, F., Razzaghi-Abyaneh, M. (2022). Prospective application of *Aspergillus* species: Focus on enzyme production strategies, advances and challenges. Chapter in a book: Natural Food Additives. IntechOpen, 2022. https://doi.org/10.5772/intechopen.101726
28. Okpara, M. (2022). Microbial enzymes and their applications in food industry: A mini-review. *Advances in Enzyme Research*, 10, 23–47. https://doi.org/10.4236/aer.2022.101002
29. Furlan, S., Schneider, A. L. S., Merkle, R., Carvalho-Jonas, M. d. S., Jonas, R. (2000). Formulation of a lactose-free, low-cost culture medium for the production of β-D-galactosidase by Kluyveromyces marxianus. *Biotechnology Letters*, 22(7), 589–593. https://doi.org/10.1023/A:1005629127532
30. Yamashita, H. (2021). Koji starter and koji world in Japan. *Journal of Fungi*, 7(7), Article 569. https://doi.org/10.3390/jof7070569
31. Hayashi, K., Kajiwara, Y., Futagami, T., Goto, M., Takashita, H. (2021). Making traditional Japanese distilled liquor, shochu and awamori, and the contribution of white and black *koji* fungi. *Journal of Fungi*, 7(7), Article 517. https://doi.org/10.3390/jof7070517
32. Barbesgaard, P., Heldt-Hansen, H. P., Diderichsen, B. (1992). On the safety of *Aspergillus oryzae*: A review. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 36(5), 569–572. https://doi.org/10.1007/BF00183230
33. Machida, M., Asai, K., Sano, M., Tanaka, T., Kumagai, T., Terai, G. et al. (2005). Genome sequencing and analysis of *Aspergillus oryzae*. *Nature*, 438(7071), 1157–1161. https://doi.org/10.1038/nature04300
34. Machida, M., Terabayashi, Y., Sano, M., Yamane, N., Tamano, K., Payne, G. A. et al. (2008). Genomics of industrial Aspergilli and comparison with toxigenic relatives. *Food Additives and Contaminants: Part A*, 25(9), 1147–1151. https://doi.org/10.1080/02652030802273114
35. Galagan, J. E., Calvo, S. E., Cuomo, C., Ma, L.-J., Wortman, J. R., Batzoglou, S., Lee, S.-I. et al. (2005). Sequencing of *Aspergillus nidulans* and comparative analysis with *A. fumigatus* and *A. oryzae*. *Nature*, 438(7071), 1105–1115. https://doi.org/10.1038/nature04341
36. Kobayashi, T., Abe, K., Asai, K., Gomi, K., Juvvadi, P. R., Kato, M. et al. (2007). Genomics of *Aspergillus oryzae*. *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*, 71(3), 646–670. https://doi.org/10.1271/bbb.60550
37. He, B., Hu, Z., Ma, L., Li, H., Ai, M., Han, J. et al. (2018). Transcriptome analysis of different growth stages of *Aspergillus oryzae* reveals dynamic changes of distinct classes of genes during growth. *BMC Microbiology*, 18(1), Article 12. https://doi.org/10.1186/s12866-018-1158-z
38. Chang, P.-K. (2019). Genome-wide nucleotide variation distinguishes Aspergillus flavus from *Aspergillus oryzae* and helps to reveal origins of atoxigenic *A. flavus* biocontrol strains. *Journal of Applied Microbiology*, 127(5), 1511–1520. https://doi.org/10.1111/jam.14419
39. Gibbons, J. G., Rinker, D. C. (2015). The genomics of microbial domestication in the fermented food environment. *Current Opinion in Genetics and Development*, 35, 1–8. https://doi.org/10.1016/j.gde.2015.07.003
40. Watarai, N., Yamamoto, N., Sawada, K., Yamada, T. (2019). Evolution of *Aspergillus oryzae* before and after domestication inferred by large-scale comparative genomic analysis. *DNA Research*, 26(6), 465–472. https://doi.org/10.1093/dnares/dsz024
41. Matsushima, K., Chang, P.-K., Yu, J., Abe, K., Bhatnagar, D., Cleveland, T. E. (2001). Pre-termination in aflR of *Aspergillus sojae* inhibits aflatoxin biosynthesis. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 55(5), 585–589. https://doi.org/10.1007/s002530100607
42. Римарева, Л. В., Серба, Е. М., Оверченко, М. Б., Таджибова, П. Ю., Серба, Е. В., Кривова, А. Ю. и др. (2019). Научно-экспериментальное обоснование

безопасности биотехнологических продуктов для пищевой промышленности. *Вестник российской сельскохозяйственной науки*, 1, 40–43. [Rimareva, L. V., Serba, E. M., Overchenko, M. B., Tadzhibova, P. Y., Serba, E. V., Krivova, A. Y. et al. (2019). Scientifically and experimental safety substitution of biotechnology products for the food processing industry. *Vestnik of the Russian Agricultural Science*, 1, 40–43. (In Russian)] https://doi.org/10.30850/vrsn/2019/1/40-43
43. Jørgensen, T. R. (2007). Identification and toxigenic potential of the industrially important fungi, *Aspergillus oryzae* and *Aspergillus sojae*. *Journal of Food Protection*, 70(12), 2916–2934. https://doi.org/10.4315/0362-028x-70.12.2916
44. Watson, A. J., Fuller, L. J., Jeenes, D. J., Archer, D. B. (1999). Homologs of aflatoxin biosynthesis genes and sequence of aflR in *Aspergillus oryzae* and *Aspergillus sojae*. *Applied and Environmental Microbiology*, 65(1), 307–310. https://doi.org/10.1128/AEM.65.1.307-310.1999
45. Chang, P.-K., Matsushima, K., Takahashi, T., Yu, J., Abe, K., Bhatnagar, D. et al. (2007). Understanding nonaflatoxigenicity of Aspergillus sojae: A windfall of aflatoxin biosynthesis research. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 76(5), 977–984. https://doi.org/10.1007/s00253-007-1116-4
46. Kim, K. M., Lim, J., Lee, J. J., Hurh, B. -S., Lee, I. (2017). Characterization of *Aspergillus sojae* isolated from Meju, Korean traditional fermented soybean brick. *Journal of Microbiology and Biotechnology*, 27(2), 251–261. https://doi.org/10.4014/jmb.1610.10013
47. Zhou, J., Wang, J., Zhou, Y., Liu, K., Lu, Y., Zhu, L. et al. (2023). Microbial community structure and interactions between *Aspergillus oryzae* and bacteria in traditional solid-state fermentation of Jiangqu. *Food Microbiology*, 116, Article 104346. https://doi.org/10.1016/j.fm.2023.104346
48. Chakraborty, A., Bhowal, J. (2023). Bioconversion of jackfruit seed waste to fungal biomass protein by submerged fermentation. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 195(4), 2158–2171. https://doi.org/10.1007/s12010-022-04063-8
49. Vasudhevan, P., Kalaimurugan, D., Ganesan, S., Akbar, N., Dixit, S., Pu, S. (2024). Enhanced biocatalytic laccase production using agricultural waste in solid-state fermentation by *Aspergillus oryzae* for p-chlorophenol degradation. *International Journal of Biological Macromolecules*, 281(Part 3), Article 136460. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.136460
50. Straka, D., Hleba, L., Ailer, Š. (2025). Koji — the only one domesticated Fungi: Characterization, enzymology, and use. *Scifood*, 19(1), 426–436. https://doi.org/10.5219/scifood.63
51. Chen, W., Lv, X., Tran, V.-T., Maruyama, J.-I., Han, K.-H., Yu, J.-H. (2022). Editorial: From traditional to modern: Progress of molds and yeasts in fermented-food production. *Frontiers in Microbiology*, 13, Article 876872. https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.876872
52. Akaike, M., Miyagawa, H., Kimura, Y., Terasaki, M., Kusaba, Y., Kitagaki, H. et al. (2020). Chemical and bacterial components of sake and its production process. *Current Microbiology*, 77(4), 632–637. https://doi.org/10.1007/s00284-019-01718-4
53. Ichikawa, E., Hirata, S., Hata, Y., Yazawa, H., Tamura, H., Kaneoke, M. et al. (2020). Effect of *koji* starter on metabolites in Japanese alcoholic beverage sake made from the sake rice *Koshitanrei*. *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*, 84(8), 1714–1723. https://doi.org/10.1080/09168451.2020.1763154
54. Ito, K., Matsuyama, A. (2021). Koji molds for Japanese soy sauce production: Characteristics and key enzymes. *Journal of Fungi*, 7(8), Article 658. https://doi.org/10.3390/jof7080658
55. Liu, Y., Sun, G., Li, J., Cheng, P., Song, Q., Lv, W. et al. (2024). Starter molds and multi-enzyme catalysis in *koji* fermentation of soy sauce brewing: A review. *Food Research International*, 184, Article 114273. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2024.114273
56. Devanthi, P. V. P., Gkatzionis, K. (2019). Soy sauce fermentation: Microorganisms, aroma formation, and process modification. *Food Research International*, 120, 364–374. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2019.03.010
57. Hong, H. H., Kim, M. K. (2020). Physiochemical quality and sensory characteristics of *koji* made with soybean, rice, and wheat for commercial doenjang production. *Foods*, 9(8), Article 975. https://doi.org/10.3390/foods9080975
58. Zou, J., Xiao, Z., Wang, X., Yang, H., Cheng, J., Liu, X. et al. (2024). The quality of beef-soybean paste and the relationship between microbial composition and flavor changes during fermentation. *Food Science and Biotechnology*, 34(1), 193–205. https://doi.org/10.1007/s10068-024-01645-6
59. Narahara, H. (1994). *Koji* mold and Product *koji* (Part 2): Handling of *koji* mold in *koji* making. *Journal of the Brewing Society of Japan*, 89(12), 954–964. https://doi.org/10.6013/jbrewsocjapan1988.89.954 (In Japanese)
60. Saeed, F., Afzaal, M., Shah, Y. A., Khan, M. H., Hussain, M., Ikram, A. et al. (2022). Miso: A traditional nutritious and health-endorsing fermented product. *Food Science and Nutrition*, 10(12), 4103–4111. https://doi.org/10.1002/fsn3.3029
61. Yee, C. S., Ilham, Z., Cheng, A., Abd Rahim, M. H., Hajar-Azhari, S., Yuswan, M. H. et al. (2024). Optimisation of fermentation conditions for the production of gamma-aminobutyric acid (GABA)-rich soy sauce. *Heliyon*, 10(13), Article e33147. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e33147
62. Sheng, Y., Qiu, S., Deng, Y., Zeng, B. (2025). Recent advances in heterologous protein expression and natural product synthesis by *Aspergillus*. *Journal of Fungi*, 11(7), Article 534. https://doi.org/10.3390/jof11070534
63. Tamano, K. (2024). Advancements in lipid production research using the koji-mold *Aspergillus oryzae* and future outlook. *Frontiers in Fungal Biology*, 5, Article 1526568. https://doi.org/10.3389/ffunb.2024.1526568
64. Xiao, M., Wang, Y., Yu, L., Yan, X., Zhu, Z., Tian, E. et al. (2025). Engineering industrial fungus *Aspergillus oryzae* for the sustainable biosynthesis of ergot alkaloids. *Green Chemistry*, 27, 438–449. https://doi.org/10.1039/D4GC04643A
65. Nakamura, M., Hattori, R., Suzuki, S., Mano, J. (2025). Upcycling whey through the production of edible *Aspergillus oryzae* cell biomass. *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*, 89(11), 1640–1648. https://doi.org/10.1093/bbb/zbaf122
66. Uchida, M., Hideshima, N., Araki, T. (2019). Production of koji by cultivating *Aspergillus oryzae* on nori (*Pyropia yezoensis*). *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 127(2), 183–189. https://doi.org/10.1016/j.jbiosc.2018.07.017
67. El-Wafai, N. A., Farrag, A. M. I., Abdel-Basit, H. M., Hegazy, M. I., Al-Goul, S. T., Ashkan, M. F. et al. (2023). Eco-friendly degradation of natural rubber powder waste using some microorganisms with focus on antioxidant and antibacterial activities of biodegraded rubber. *Processes*, 11(8), Article 2350. https://doi.org/10.3390/pr11082350
68. Bulkan, G., Sitaresmi, S., Yudhanti, G. T., Millati, R., Wikandari, R., Taherzadeh, M. J. (2021). Enhancing or inhibitory effect of fruit or vegetable bioactive compound on *Aspergillus niger* and *A. oryzae*. *Journal of Fungi*, 8(1), Article 12. https://doi.org/10.3390/jof8010012
69. Seidler, Y., Rimbach, G., Lüersen, K., Vinderola, G., Ipharraguerre, I. R. (2024). The postbiotic potential of *Aspergillus oryzae* — A narrative review. *Frontiers in Microbiology*, 15, Article 1452725. https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1452725
70. Sun, Z., Wu, Y., Long, S., Feng, S., Jia, X., Hu, Y. et al. (2024). *Aspergillus oryzae* as a cell factory: Research and applications in industrial production. *Journal of Fungi*, 10(4), Article 248. https://doi.org/10.3390/jof10040248

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ	AUTHOR INFORMATION
Принадлежность к организации	**Affiliation**
Ковалёв Кирилл Александрович — аспирант, кафедра технологические машины и оборудование, Астраханский государственный технический университет 414056, Россия, Астрахань, ул. Татищева, стр. 16/1 E-mail: kirill.koval.12@mail.ru ORCID: https://orcid.org/0009-0005-8206-7077	**Kirill A. Kovalev**, Postgraduate Student, Department of Technological Machinery and Equipment, Astrakhan State Technical University 16/1 Tatishcheva St., 415056, Astrakhan, Russia E-mail: kirill.koval.12@mail.ru ORCID: https://orcid.org/0009-0005-8206-7077
Неповинных Наталия Владимировна — доктор технических наук, доцент, профессор, кафедра технологические машины и оборудование, Астраханский государственный технический университет 414056, Россия, Астрахань, ул. Татищева, стр. 16/1 кафедра технологии продуктов питания, Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии им. Н. И. Вавилова 410012, Россия, Саратов, проспект Петра Столыпина, зд. 4, стр. 3 E-mail: nnepovinnykh@yandex.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2923-9202 * автор для контактов	**Nataliia V. Nepovinnykh**, Doctor of Technical Science, Professor, Department of Technological Machinery and Equipment, Astrakhan State Technical University 16/1 Tatishcheva St., 415056, Astrakhan, Russia Foodstuff Technology Department, Saratov State University of Genetics, Biotechnology and Engineering named after N. I. Vavilov 4, building 3, Peter Stolypin Ave., 410012, Saratov, Russia E-mail: nnepovinnykh@yandex.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2923-9202 * corresponding author
Критерии авторства	**Contribution**
Ковалёв Кирилл Александрович — обзор литературы, написание статьи. **Неповинных Наталия Владимировна** — научное руководство, анализ результатов исследований, написание и редактирование.	**K. A. Kovalev** — literature review, manuscript preparation. **N. V. Nepovinnykh** — scientific supervision, analysis of research results, writing and editing.
Конфликт интересов	**Conflict of interest**
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.	The authors declare that there is no conflict of interest.

DOI: https://doi.org/10.21323/2618-9771-2026-9-2-254-260

Received 09.08.2025
Accepted in revised 26.05.2026
Accepted for publication 29.05.2026
© Bouhadi D., Belkhodja H., Elouissi A., Benattouche Z., Remil A., Hariri A., 2026
Available online at https://www.fsjour.com/jour
Original scientific article
Open access

EXTRACTION AND CHARACTERIZATION OF CHICKEN PEPSIN WITH EVALUATION OF ITS MILK-CLOTTING ACTIVITY IN SKIM MILK

Djilali Bouhadi[1]*, Hamza Belkhodja[1], Abdelkader Elouissi[2], Zouaoui Benattouche[1], Abderrahmane Remil[3], Ahmed Hariri[1]

[1]Laboratory of Bioconversion, Microbiology Engineering and Health Safety, University Mustapha Stambouli of Mascara, Mascara, Algeria
[2]Biological Systems and Geomatics Research Laboratory (LRSBG), University Mustapha Stambouli of Mascara, Mascara, Algeria
[3]Laboratory of Organic, Macromolecular Chemistry and Materials, University of Mustapha Stambouli, Mascara, Algeria

KEYWORDS:
chicken pepsin, pepsin extraction, milk-clotting activity, skim milk

ABSTRACT

The development of poultry farming creates opportunities to obtain pepsin, a proteolytic enzyme with milk-clotting activity, from the chicken proventriculus (*Gallus gallus*). This organ, considered a by-product, can serve as a source of proteases, including milk-clotting enzymes that may be used as substitutes for conventional milk-clotting agents in the dairy industry. This study aims to extract pepsin from chicken proventriculus, characterize it, and evaluate its potential use as a rennet substitute. It also attempts to determine the optimal milk clotting conditions (enzyme volume, pH, temperature, and $CaCl_2$ concentration) based on milk flocculation and clotting times. According to the obtained results, the clarified extract of chicken pepsin showed a milk-clotting activity of 63.48 ± 0.21 RU/ml, a specific milk-clotting activity of 1.56 ± 0.19 (RU mg^{-1}), a clotting strength of 12957 ± 399 (SU), a protein content of 43.49 ± 0.75 mg/mL, and a proteolytic activity of 0.91 ± 0.140 µg/mL·h. The highest milk-clotting activity of chicken pepsin was observed between 38 °C and 40 °C, at pH 6.6 and 6.8, with an enzyme volume of 3 mL, and at a $CaCl_2$ concentration of 5 mM. The obtained results indicate the potential use of chicken pepsin as a substitute for rennet in milk clotting. It could also be used in other biological or industrial applications.

Поступила 09.08.2025
Поступила после рецензирования 26.05.2026
Принята в печать 29.05.2026
© Бухади Д., Белходжа Х., Элуисси А., Бенаттуш З., Ремил А., Харири А., 2026
https://www.fsjour.com/jour
Научная статья
Открытый доступ

ЭКСТРАКЦИЯ И ХАРАКТЕРИСТИКА КУРИНОГО ПЕПСИНА С ОЦЕНКОЙ ЕГО МОЛОКОСВЕРТЫВАЮЩЕЙ АКТИВНОСТИ В ОБЕЗЖИРЕННОМ МОЛОКЕ

Бухади Д.[1],* Белходжа Х.[1], Элуисси А.[2], Бенаттуш З.[1], Ремил А.[3], Харири А.[1]

[1]Лаборатория биоконверсии, микробиологической инженерии и охраны здоровья, Маскарский Университет Мустафы Стамбула, Маскара, Алжир
[2]Лаборатория исследований биологических систем и геоматики, Маскарский Университет Мустафы Стамбула, Маскара, Алжир
[3]Лаборатория органической, макромолекулярной химии и материалов, Маскарский Университет Мустафы Стамбула, Маскара, Алжир

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:
куриный пепсин, экстракция пепсина, молокосвертывающая активность, обезжиренное молоко

АННОТАЦИЯ

Развитие птицеводства открывает возможности для получения пепсина, протеолитического фермента с молокосвертывающей активностью, из железистого желудка кур (*Gallus gallus*). Этот орган, считающийся побочным продуктом производства, может служить источником протеаз, в том числе молокосвертывающих ферментов, которые могут использоваться в качестве заменителей традиционных коагулянтов в молочной промышленности. Цель данного исследования — извлечь пепсин из железистого желудка кур, охарактеризовать его и оценить его потенциальное использование в качестве заменителя сычужного фермента. Также предпринята попытка определить оптимальные условия коагуляции молока (объем фермента, pH, температура и концентрация $CaCl_2$) на основе времени флокуляции и коагуляции молока. Согласно полученным результатам, осветленный экстракт куриного пепсина показал молокосвертывающую активность 63.48 ± 0.21 RU/мл, удельную молокосвертывающую активность 1.56 ± 0.19 (RU $мг^{-1}$), прочность геля 12957 ± 399 (SU), содержание белка составляло 43,49 ± 0,75 мг/мл, а протеолитическая активность — 0,91 ± 0,140 мкг/мл·ч. Наибольшая молокосвертывающая активность куриного пепсина наблюдалась в диапазоне температур от 38 °C до 40 °C, при pH 6.6 и 6.8, объеме фермента 3 мл и концентрации $CaCl_2$ 5 мМ. Полученные результаты указывают на потенциальную возможность использования куриного пепсина в качестве заменителя сычужного фермента при коагуляции молока, а также в других биологических или промышленных целях.

1. Introduction

Proteases are among the most widely used commercial enzymes due to their multiple applications in various fields [1]. Protease sales alone account for over 60% of total enzyme sales [2]. These enzymes play an important role in the pharmaceutical and food industries, as well as in industrial biotechnology. The food industry is the largest consumer of proteases [3]. Within this industry, one of the major applications is the use of rennet in cheesemaking [4].

Cheesemaking involves several steps, one of the most fundamental of which is milk clotting. Clotting is traditionally achieved by the action of rennet, which is industrially extracted from the abomasum of unweaned calves [5,6]. Until the 1950s, rennet was the dominant enzyme used in cheesemaking [7]. However, its availability declined because its production depends on the meat industry. Currently, traditional animal rennet production covers only 20–30% of the coagulant demand [8].

The shortage of rennet on the global market has led to an increase in its price. At the same time, cheese production has gradually increased over the years. This situation has prompted the search for alternative enzyme preparations of various origins that can coagulate milk in a similar way to rennet [9,10]. In the search for rennet substitutes, microbial

FOR CITATION: **Bouhadi, D., Belkhodja, H., Elouissi, A., Benattouche, Z., Remil, A., Hariri, A.** (2026). Extraction and characterization of chicken pepsin with evaluation of its milk-clotting activity in skim milk. *Food Systems,* 9(2), 254–260. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2026-9-2-254-260

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: **Бухади, Д., Белходжа, Х., Элуисси, А., Бенаттуш, З., Ремил, А., Харири, А.** (2026). Экстракция и характеристика куриного пепсина с оценкой его молокосвертывающей активности в обезжиренном молоке. *Пищевые системы*, 9(2), 254–260. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2026-9-2-254-260

proteases, particularly those produced by genetically modified microorganisms, have yielded satisfactory results [11]. However, in recent years, natural extracts have attracted increasing attention as an alternative [12]. They have high proteolytic activity and are generally active over a wide range of temperatures and pH [13].

Among the substitutes, chicken pepsin (EC 3.4.23.1) is a protease with milk-clotting activity [14]. Chicken pepsin is an enzyme extracted from chicken proventriculi (*Gallus gallus*), which is considered a by-product of slaughter. These organs, averaging 3 cm in length, are located above the gizzard and covered with a layer of epithelium formed of columnar cells. These cells are responsible for the secretion of pepsinogen and hydrochloric acid. This by-product could be valorized because of the ease of pepsin extraction, its increasing availability, associated with the development of poultry farming, and its potential direct use, particularly in cheesemaking, as a means of addressing rennet shortages.

Extensive research has been conducted on the effect of chicken pepsin on milk clotting. However, limited information is available on the effects of pepsin on proteolysis and the sensory characteristics of cheeses. Several factors, including enzyme volume, temperature, pH, and Ca^{2+} concentration, influence enzyme-induced milk clotting [13]. This study aims to optimize clotting conditions using clotting times of skim milk treated with chicken pepsin as optimization criteria.

2. Objects and methods

2.1. Berridge substrate

The Berridge substrate is obtained by dissolving skim milk powder at 12 % (w/v) in 0.01M $CaCl_2$ solution. To prevent microbial growth, sodium azide is added at 0.04 % (w/v). The milk is then stored at 4 °C for at least 12 hours to ensure complete rehydration and stabilization of the casein micelles.

2.2. Chicken pepsin extract

After the chickens were slaughtered and eviscerated, approximately 10 kg of proventriculi were transported to the laboratory under refrigerated conditions. The proventriculi were trimmed of fat, rinsed under running water, and drained. Pepsin extraction was carried out according to [15] by grinding 100 g of proventriculi in 300 mL of a solution containing 30 g/L NaCl and 7g/L $NaHCO_3$, and stirring the mixture for 3 hours at 4 °C. After filtering, the crude extract was acidified with 3M HCl to pH 2 to activate the pepsin, and the mixture was incubated for 30 min. The pH was subsequently adjusted to 6.6 using 1M NaO H.

2.3. Physicochemical analysis of skim milk

Milk pH was measured at 25 °C using a pH meter (HI2210, Hanna Instruments, USA; resolution: 0.01 pH units), calibrated with buffer solutions prior to use. Titratable acidity was determined by titrating milk with 0.1M NaOH in the presence of phenolphthalein as an indicator. Milk density was measured using a lactodensimeter (acc. Gerber, large T20 °C, Funke Gerber, Germany). The concentrations of mineral elements were determined by atomic absorption spectrometry (DW-220A/B Monochrome Czerny-Turner, Chongqing Drawell Instrument, China) (ISO 6869:2000[1])

Total solids content was determined by drying at 103 ± 2 °C for 3 hours (ISO 6731:2010[2]). Nitrogen content was determined by the Kjeldahl method (ISO 8968-1: 2014[3]), and converted to protein content according to the following equation: $Mp = MN \times 6.25$ (*Mp*: protein mass, *MN*: nitrogen mass). Fat content was determined according to the Gerber method (ISO 19662:2018[4]), and lactose content was determined by the Bertrand method (ISO 26462:2010[5]).

2.4. Determination of optimal clotting conditions

To better characterize the milk-clotting properties of chicken pepsin, we studied the variation of clotting time as a function of pH, temperature, and $CaCl_2$ concentration. The shortest flocculation time recorded for each parameter indicated greater milk-clotting activity. The pH, temperature, and $CaCl_2$ concentration values were determined as follows:

The pH was adjusted to 5.6, 5.8, 6.0, 6.2, 6.4, 6.6, and 6.8 with HCl (0.1M) or NaOH (0.1M) solutions in tubes, each containing 10 mL of Berridge substrate of the same preparation at 30 °C in a water bath (Memmert GmbH + Co. KG, Germany). One mL of each enzymatic dilution (chicken pepsin) was added, and the clotting time was determined [7].

To assess the effect of temperature, tubes containing 10 mL of Berridge substrate at pH 6.6 were incubated in the water bath (Memmert GmbH + Co. KG, Germany) at temperatures ranging from 28 °C to 40 °C (2 °C intervals). After 5 minutes of incubation, 1 mL of each enzyme dilution (chicken pepsin) was added, and the clotting time was recorded.

The influence of milk $CaCl_2$ concentration on the milk-clotting activity of the enzyme extract was studied at 35 °C and pH 6.5, using the Berridge substrate prepared with $CaCl_2$ concentrations ranging from 5 mM to 35 mM (range of 5 mM intervals). The effect of enzyme volume on the proteolytic activity of the enzymatic extract of pepsin was determined according to [16] by varying the enzymatic volume from 1 to 7 mL.

2.5. Characterization of the enzymatic extract

One mL of diluted chicken pepsin solution was added to 10 mL of prewarmed Berridge substrate in assay tubes at 30 °C. The clotting time was recorded as the point at which the first visible flakes appeared on the surface of the tilted tube. Milk-clotting activity was expressed in Rennet Units (RU), where one RU is defined as the amount of enzyme in 1 mL that coagulates 10 mL of standard substrate in 100 seconds at 30 °C [4], according to the following equation:

$$\text{RU (mL}^{-1}) = (10 \times V)/(T \times v), \quad (1)$$

where RU: Rennet unit, *V*: milk volume, *v*: enzyme volume, *T*: clotting time (sec).

Protein content of the enzyme extract was determined using the same method as described for milk proteins, with the conversion factor of 6.25. Clotting strength is defined as the volume of milk coagulated per unit volume of enzyme extract, within 40 min, at 35 °C and pH 6.4. Specific activity was calculated directly as the number of units of activity per unit mass (RU/mg) of protein. This parameter reflects the degree of enzyme purity [12].

Proteolytic activity was determined according to [17]. This assay measures the rate of casein degradation by the enzyme during the primary (enzymatic) phase. For this purpose, the concentration of casein hydrolysis products soluble in trichloroacetic acid (TCA) at a final concentration of 12 % was measured.

2.6. Statistical methodology

Data analysis was carried out using a one-way analysis of variance (ANOVA) to evaluate the effect of different levels of a single independent factor (e.g., pH, temperature, concentration, etc.) on a dependent variable (e.g., clotting time). ANOVA tests the null hypothesis that all group means are statistically equal. Before the analysis, the assumptions of residual normality and homogeneity of variances were verified using the Shapiro-Wilk test and Levene's test, respectively.

In cases where ANOVA yielded a statistically significant result ($p < 0.05$), Tukey's Honest Significant Difference (HSD) post hoc test was applied to identify specific differences between group means. This test controls the Type I error rate during multiple comparisons while maintaining good statistical power [18]. Results were visualized as bar charts, with letters indicating homogeneous groups according to Tukey's test. All statistical analyses were conducted using R software [19], with the agricolae package [20].

3. Results and discussion

3.1. Milk characteristics

The physicochemical composition of the reconstituted skim milk used as the Berridge substrate (12 %, w/v) was determined to characterize the experimental substrate. The results are summarized in Table 1.

Table 1. **Physicochemical characteristics of the milk used**
Таблица 1. **Физико-химические характеристики использованного молока**

Characteristic	Mean value
Total solids content (g·100 mL^{-1})	12.16 ± 0.04
Total protein (g·100 mL^{-1})	3.58 ± 0.12
Fat (g·100 mL^{-1})	0.11 ± 0.01
pH	6.8 ± 0.09
Ash (g·100 mL^{-1})	0.91 ± 0.14
Titratable acidity (g lactic acid · L^{-1})	1.8 ± 0.1

[1] ISO 6869:2000: Animal feeding stuffs — Determination of the contents of calcium, copper, iron, magnesium, manganese, potassium, sodium and zinc — Method using atomic absorption spectrometry. Technical Committee : ISO/TC 34/SC 10.

[2] ISO 6731:2010: Milk, cream and evaporated milk — Determination of total solids content. Technical Committee : ISO/TC 34/SC 5.

[3] ISO 8968–1: 2014: Milk and milk products — Determination of nitrogen content — Part 1: Kjeldahl principle and crude protein calculation. Technical Committee: ISO/TC 34/SC 5.

[4] ISO 19662:2018 Determination of fat content — Acido-butyrometric (Gerber method). Technical Committee: ISO/TC 34/SC 5.

[5] ISO 26462:2010: Milk — Determination of lactose content — Enzymatic method using difference in pH. Technical Committee : ISO/TC 34/SC 5.

According to [21], the pH of milk varies between 6.60 and 6.91; values outside this range are indicative of abnormal milk. In the case of infection, the pH tends towards alkalinity or acidity, so the milk used can be considered normal. Given its satisfactory protein content (3.58 %) and low total fat content, this milk was considered a suitable substrate for determining the milk-clotting activity and clotting time of the enzyme studied. Optimal milk-clotting activity has been reported in milk with a total fat content below 1 % [3].

3.2. Crude extract characteristics

The characteristics of the chicken pepsin extract (protein content, milk-clotting activity, clotting strength, specific activity, and proteolytic activity) are presented in Table 2.

Table 2. **The main characteristic of the enzymatic extract**
Таблица2. Основные **характеристики ферментативного экстракта**

Characteristic	Chicken pepsin extract
Clotting strength (SU)	12957 ± 399
Milk-clotting activity (RU ml^{-1})	63.48 ± 0.21
Protein (mg mL^{-1})	43.49 ± 0.75
Specific activity (RU mg^{-1}) *	1.56 ± 0.19
Proteolytic activity (μg/mL · h)	0.91 ± 0.14
pH	7.9 ± 0.01
Color	Yellowish solution

* Specific activity (RU mg^{-1}) = clotting activity (RU mL^{-1})/protein content (mg mL^{-1}).

The clarified pepsin extract appeared as a yellowish solution. The protein content of the extract obtained was 43.49 ± 0.75 mg/mL, which is higher than the value reported by [3] (20.00 ± 0.00 mg/mL) and comparable to that reported by [6] (38.40 ± 0.40 mg/mL).

The result obtained indicates a proteolytic activity of 0.91 ± 0.14 μg/mL.h for chicken pepsin. This relatively high proteolytic activity of pepsin has been reported by several authors [22–24]. The milk-clotting activity was 63.48 ± 0.21 RU/mL, which is considerably higher than that reported by [3] (1.98 ± 0.02 RU/mL). The clotting strength was 12957 ± 399 SU. These differences may be attributed to factors such as age and feed of chickens, the maceration solution used, and extraction conditions.

3.3. Effect of enzyme volume on clotting time

One-way ANOVA revealed significant differences in clotting time across enzyme volume levels ($F = 9.484$, $p < 0.001$). Figure 1 illustrates the effect of enzyme volume on clotting time (in seconds).

Each point represents the mean clotting time; error bars represent standard deviation (SD). The letters indicate homogeneous groups according to Tukey's test at the 5 % significance level.

Clotting time decreased significantly as the enzyme volume increased from 1 mL to 3 mL, reaching a minimum at 3 mL (group "c"). Beyond this point, clotting time increased, with the values at 5 mL and 7 mL belonging to groups "ab" and "a", respectively, and showing no significant difference from the extreme enzyme volume. Statistically, both 1 mL and 7 mL enzyme volume resulted in significantly longer clotting times than the 3 mL. These results suggest a non-linear relationship between enzyme volume and clotting time, with an optimal enzyme volume of 3 mL. A positive correlation (r>0.75) between the rate of gel formation, gel firmness, clotting time, and enzyme volume has been reported [3].

3.4. Effect of pH on clotting time

Figure 2 displays the relationship between pH and clotting time. The results show a strong decreasing trend in clotting time with increasing pH. This trend was confirmed by one-way ANOVA, which revealed a highly significant effect of pH on clotting time ($F = 51.19$, $p < 0.001$). Specifically, pH 5.6 and 5.8 were associated with the longest clotting times (group "a"), whereas pH 6.6 and 6.8 resulted in significantly shorter clotting times (groups "d" and "cd"). These findings suggest that milk-clotting activity of chicken pepsin increases with pH, with optimal values observed at pH 6.6–6.8.

It should be noted that the optimal pH for overall milk-clotting activity observed in the present study (6.6–6.8) is distinct from the pH optimum reported in the literature for the specific enzymatic hydrolysis of the Phe^{105}-Met^{106} bond of κ-casein (pH 5.1–5.3). This apparent discrepancy reflects the fact that milk clotting is a two-stage process: an enzymatic phase involving proteolytic cleavage of κ-casein, followed by a non-enzymatic aggregation phase governed by the colloidal properties of destabilized casein micelles [25]. While acidic conditions (pH ~5.1–5.3) maximize the rate of κ-casein hydrolysis by optimizing the catalytic geometry of the aspartic protease active site, the subsequent aggregation of para-κ-casein-bearing micelles is thermodynamically and kinetically more favorable at near-neutral pH values, where electrostatic repulsion is partially maintained but hydrophobic interactions can still drive network formation [26]. Consequently, the pH at which the integrated clotting activity — encompassing both proteolysis and aggregation — is maximized differs from the pH optimum of the proteolytic step alone. This two-stage pH dependence is consistent with observations reported for other plant- and animal-derived aspartic proteases used as alternative coagulants [27].

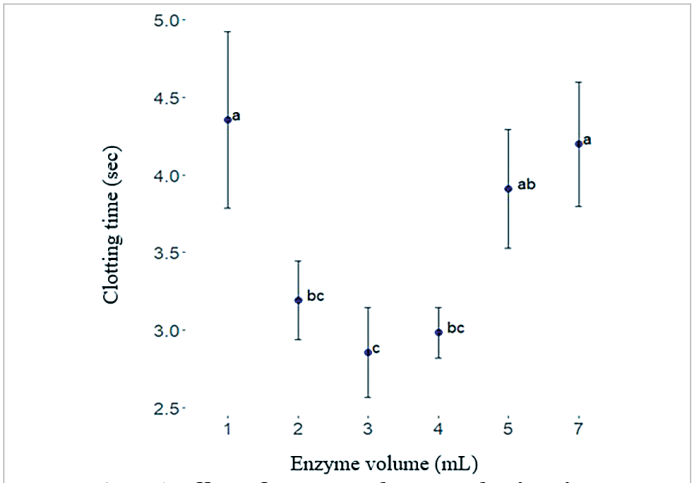


Figure 1. **Effect of enzyme volume on clotting time**
Рисунок 1. **Влияние объёма фермента на время свёртывания**

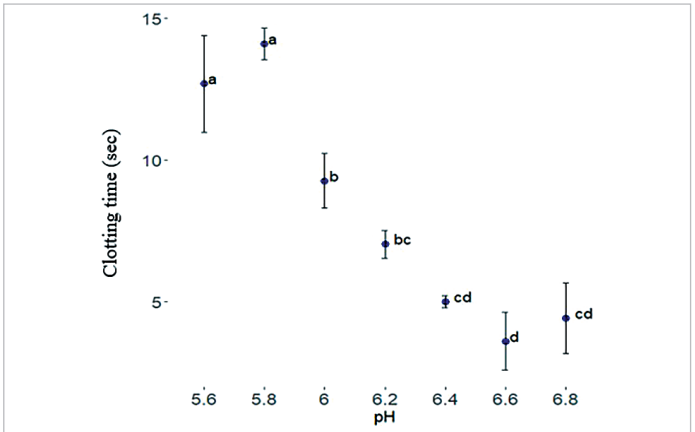


Figure 2. **Effect of pH on clotting time**
Рисунок 2. **Влияние pH на время свёртывания**

Each point represents the mean clotting time; error bars represent standard deviation (SD). The letters indicate homogeneous groups according to Tukey's test at the 5 % significance level.

3.5. Effect of Temperature on clotting time

Figure 3 demonstrates that clotting time varies significantly with temperature ($F = 3.858$, $p = 0.0175$, one-way ANOVA). The longest clotting time was recorded at 40 °C, indicating slower clot formation.

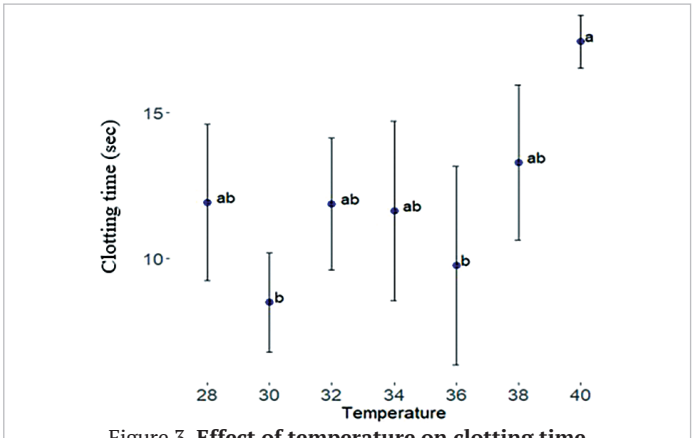


Figure 3. **Effect of temperature on clotting time**
Рисунок 3. **Влияние температуры на время свёртывания**

In comparison, 30 °C and 36 °C were associated with the shortest clotting times. Intermediate temperatures (28 °C, 32 °C, 34 °C, and 38 °C, group "ab") showed no significant difference from either group "a" or group "b". From 36 °C onward, clotting time showed an increasing trend, reaching its maximum at 40 °C.

The enzymatic clotting of milk is highly temperature-dependent. The rate of coagulum (gel) formation increases progressively as the temperature rises from 32 °C to 38 °C, which is near the optimum range for most milk-clotting enzymes. Below approximately 28 °C, gelation does not occur because the secondary (aggregation) phase is strongly inhibited, even if some enzymatic hydrolysis takes place. Increasing the clotting temperature primarily accelerates the secondary phase (micelle aggregation) by enhancing hydrophobic interactions and the mobility of rennet-altered micelles. However, at temperatures above ~38–40 °C, the overall clotting process slows down due to partial thermal inactivation or reduced stability of the coagulant enzyme itself [27].

Each point represents the mean clotting time; error bars represent standard deviation (SD). The letters indicate homogeneous groups according to Tukey's test at the 5 % significance level.

3.6. Effect of $CaCl_2$ on clotting time

Figure 4 shows the variation in clotting time as a function of $CaCl_2$ concentration. Although Ca^{2+} addition is generally reported to shorten clotting time in rennet- or pepsin-induced milk clotting, no significant effect was observed in the present study ($F = 1.291$, $p = 0.323$). This lack of response suggests that, under our experimental conditions, calcium was not the limiting factor controlling flocculation kinetics. One possible explanation is that the native calcium content of the milk already provided sufficient ionic strength to support micelle aggregation, so that additional Ca^{2+} did not further enhance bridging or reduce electrostatic repulsion [28].

In addition, the enzyme-driven hydrolysis of κ-casein may have been the rate-limiting step, masking any potential effect of calcium on the secondary aggregation phase. Similar weak or non-significant responses to added $CaCl_2$ have been reported [26] in systems where micelle destabilization is primarily governed by enzymatic activity rather than ionic calcium availability or where calcium equilibrium between soluble and micellar phases is already near saturation. Therefore, while Ca^{2+} is theoretically expected to enhance aggregation through charge shielding and calcium bridging between casein micelles, its effect appears to be highly dependent on milk composition, enzyme type, and baseline mineral balance, which likely explains the absence of a significant effect in the present work [29].

Each point represents the mean clotting time; error bars represent standard deviation (SD). The letters indicate homogeneous groups according to Tukey's test at the 5 % significance level.

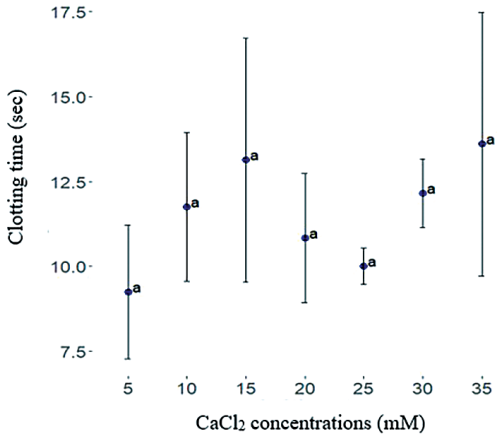


Figure 4. **Effect of $CaCl_2$ on clotting time**
Рисунок 4. **Влияние $CaCl_2$ на время свёртывания**

3.7. Effect of enzyme volume on flocculation time

Figure 5 illustrates the variation in flocculation time as a function of enzyme volume. At lower enzyme volumes of 1 and 2 mL, flocculation time was significantly longer, nearly 100 seconds. From 3 mL onwards, there was a marked reduction in flocculation time, with all higher volumes (3–7 mL) forming a single group ("b"), indicating no significant differences among them. These results suggest that increasing the enzyme volume beyond 2 mL leads to a substantial reduction in flocculation time, with no further significant reduction observed at higher volumes. As with any enzymatic reaction, the enzyme volume has a significant influence on the milk flocculation process. The flocculation time decreases with increasing enzyme volume [30–33].

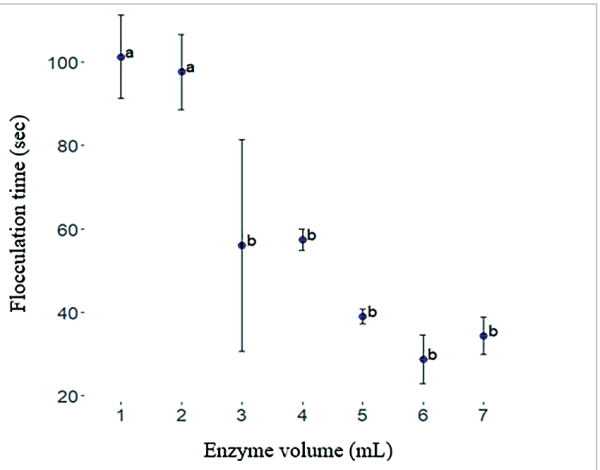


Figure 5. **Effect of enzyme volume on flocculation time**
Рисунок 5. **Влияние объёма фермента на время флокуляции**

Each point represents the mean clotting time; error bars represent standard deviation (SD). The letters indicate homogeneous groups according to Tukey's test at the 5 % significance level.

3.8. Effect of pH on flocculation time

Figure 6 presents the variation in flocculation time as a function of pH. One-way ANOVA ($F = 49.15$, $p < 0.001$) followed by Tukey's HSD test revealed significant differences across pH levels, grouping the values into four homogeneous categories. Flocculation time was shortest at acidic pH values (5.6 and 5.8), both forming group "d". As pH increased, flocculation time gradually rose, reaching its maximum at pH 6.8, which belonged to group "a". Intermediate values (pH 6.0 to 6.6) formed groups ("cd", "c", and "b"), reflecting a clear upward trend. The observed pH dependence of flocculation time can be explained by the combined effects of casein micelle surface charge and the efficiency of enzymatic hydrolysis under different acidity conditions. At pH values closer to the isoelectric point of caseins, electrostatic repulsion between micelles is reduced, which facilitates aggregation and leads to a shorter flocculation time [34].

Each point represents the mean clotting time; error bars represent standard deviation (SD). The letters indicate homogeneous groups according to Tukey's test at the 5 % significance level.

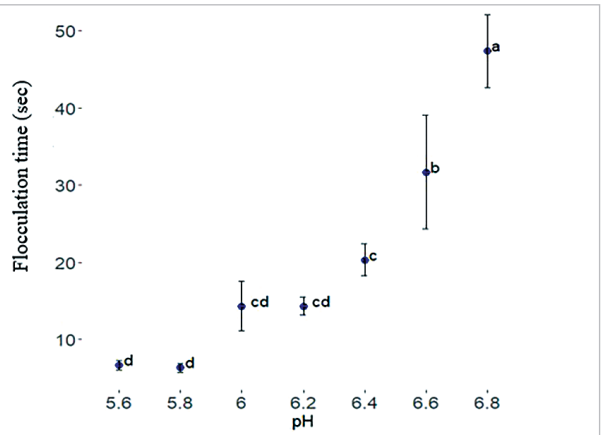


Figure 6. **Effect of pH on flocculation time**
Рисунок 6. **Влияние pH на время флокуляции**

3.9. Effect of temperature on flocculation time

Figure 7 illustrates the relationship between flocculation time and temperature. One-way ANOVA revealed a statistically significant effect of temperature on flocculation time ($F = 4.889$, $p = 0.0068$). According to Tukey's HSD post hoc test, the data were grouped into partially overlapping homogeneous groups. The shortest flocculation time was recorded at 36 °C (group "b"), indicating optimal performance at this temperature. In contrast, longer flocculation times were observed at both lower (28–30 °C) and higher (40 °C) temperatures. This suggests a U-shaped relationship, with moderate temperatures prompting faster flocculation than temperature extremes.

The influence of temperature can be attributed to its impact on two main processes: the enzymatic reaction itself and the subsequent clotting

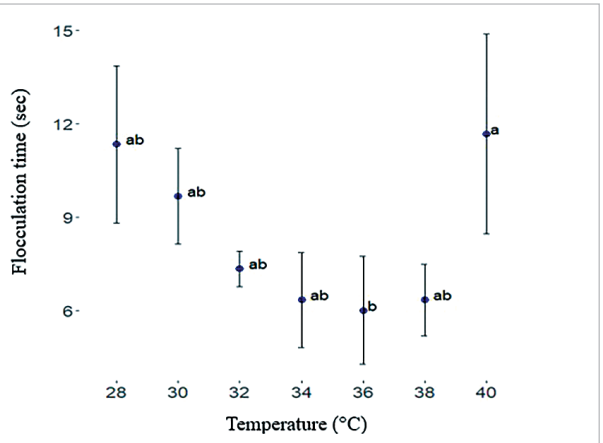


Figure 7. **Effect of temperature on flocculation time**
Рисунок 7. **Влияние температуры на время флокуляции**

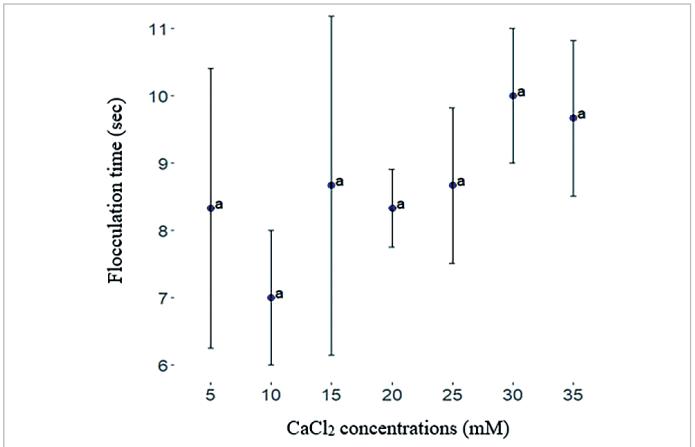


Figure 8. **Effect of $CaCl_2$ concentration on flocculation time**
Рисунок 8. **Влияние концентрации $CaCl_2$ на время флокуляции**

phase, particularly the aggregation stage. Milk clotting typically occurs at temperatures of 18 °C or above, as hydrophobic interactions become the dominant force driving the aggregation of hydrolyzed micelles [34–38]. Moreover, enzyme thermal inactivation is associated with partial unfolding of its native three-dimensional structure due to the disruption of non-covalent interactions, including hydrogen bonds and hydrophobic interactions.

Under more severe heating conditions, these structural alterations may become irreversible, involving not only conformational changes but also covalent modifications of the primary structure, including chemical damage and irreversible alterations of amino acid side chains such as oxidation, deamidation, or peptide bond cleavage. In the present study, the increase in flocculation time observed at 40 °C is therefore consistent with the onset of thermal inactivation of chicken pepsin, whereby progressive structural alterations at this temperature reduce the enzyme's proteolytic efficiency toward κ-casein, slowing the rate of Phe^{105}-Met^{106} bond hydrolysis and consequently delaying the destabilization of casein micelles and the onset of the secondary aggregation phase [39].

Each point represents the mean clotting time; error bars represent standard deviation (SD). The letters indicate homogeneous groups according to Tukey's test at the 5 % significance level.

3.10. Effect of $CaCl_2$ on flocculation time

Figure 8 illustrates the variation in flocculation time as a function of $CaCl_2$ concentration. One-way ANOVA revealed no significant effect of $CaCl_2$ concentration on flocculation time ($F = 1.291$, $p = 0.323$).

The addition of calcium chloride ($CaCl_2$) to milk is generally reported to reduce pH slightly and enhance protein aggregation, thereby accelerating clotting [40]. In agreement with previous studies, the effect of calcium is known to be strongly pH-dependent, with improved gel formation typically observed at near-neutral pH values (≈6.5–6.7) [41]. Under such conditions, Ca^{2+} ions promote micellar aggregation by reducing electrostatic repulsion and facilitating calcium bridging between casein micelles [42,43].

However, in the present study, no statistically significant effect of $CaCl_2$ concentration on flocculation time was observed. This apparent discrepancy may be explained by several factors. The absence of a significant $CaCl_2$ effect on flocculation time in the present study may be attributed to three concurring factors: the baseline calcium content of the reconstituted Berridge substrate may have already reached the threshold for near-optimal micelle aggregation [44]. the proteolytic activity of chicken pepsin may have been the dominant rate-limiting factor under the present experimental conditions, thereby subordinating the contribution of calcium to the overall clotting process [45].

Each point represents the mean clotting time; error bars represent standard deviation (SD). The letters indicate homogeneous groups according to Tukey's test at the 5 % significance level.

4. Conclusion

These findings confirm that chicken pepsin possesses effective milk-clotting activity under optimized conditions and represents a promising, and biologically sustainable alternative to conventional rennet. However, the present study was conducted under controlled conditions using a reconstituted skim milk substrate, and the transferability of these findings to actual cheesemaking conditions remains to be established. Future work should therefore focus on direct cheesemaking trials evaluating the impact of chicken pepsin on yield, texture, proteolysis profiles, and sensory properties, in order to fully assess its practical potential as a rennet substitute in dairy processing.

REFERENCES

1. Bittante, G., Amalfitano, N., Bergamaschi, M., Patel N., Haddi, M. -L., Benabid, H. et al. (2021). Composition and aptitude for cheese-making of milk from cows, buffaloes, goats, sheep, dromedary camels, and donkeys. *Journal of Dairy Science,* 105(Suppl 2), 2132–2152. https://doi.org/10.3168/jds.2021-20961
2. Felfoul, I., Bouazizi, A., Attia, H., Karoui, R. (2022). Monitoring of acid-induced coagulation of dromedary and cow's milk using different complementary analytical techniques. *Food Control*, 136, Article 108867. https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2022.108867
3. Bouras, B., Aïssaoui-Zitoun, O., Benyahia, F.-A., Djeghim, F., Zidoune, M.N. (2022). Optimization of flocculation and coagulation time of camel milk with camel and goat rennets, and chicken pepsin in comparison with cow milk using response surface method (RSM). *Emirates Journal of Food and Agriculture*, 34(7), 575–585. https://doi.org/10.9755/ejfa.2022.v34.i7.2881
4. Fguiri, I., Atigui, M., Sboui, A., Samira, A., Marzougui, C., Dbara, M. et al. (2021). Camel milk-coagulation using plant extracts as a substitute to commercial rennet. *Journal of Chemistry*, 2021, Article 6680246. https://doi.org/10.1155/2021/6680246
5. Benyahia-Krid, F. A., Adoui, F., Aissaoui-Zitoun, O., Boughellout, H., Siar, E., Zikiou, A. et al. (2017). Effect of sodium chloride and incision on the chicken pepsin coagulant activity extracted from proventriculus, dried under partial vacuum. *Journal of Advanced Dairy Research*, 5(3), Article 187. https://doi.org/10.4172/2329-888X.1000187
6. Lamothe, S., Britten, M. (2023). Coagulation and proteolysis of high-protein milks in the gastric environment. *Journal of Dairy Science*, 106(8), 5242–5252. https://doi.org/10.3168/jds.2022-22714
7. Siamand, R., Deeth, H. C., Al-Saadi, J. M. S. (2014). Textural and sensory properties of a calcium-induced milk gel. *Journal of Food Engineering*, 139, 10–12. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2014.04.014
8. Ye, A., Liu, W., Cui, J., Kong, X., Roy, D., Kong, Y. (2019). Coagulation behaviour of milk under gastric digestion: Effect of pasteurization and ultra-high temperature treatment. *Food Chemistry*, 286, 216–225. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.02.010
9. García, V., Rovira, S., Boutoial, K., Álvarez, D., López, M. (2014). A comparison of the use of thistle (*Cynara cardunculus* L.) and artichoke (*Cynara scolymus* L.) aqueous extracts for milk coagulation. *Dairy Science and Technology*, 95(2), 197–208. https://doi.org/10.1007/s13594-014-0197-y
10. Lucey, J. A., Tamehana, M., Singh, H., Munro, P. A. (2000). Rheological properties of milk gels formed by a combination of rennet and glucono-δ-lactone. *Journal of Dairy Research*, 67(3), 415–427. https://doi.org/10.1017/S0022029900004246
11. Juan, b., Trujillo, A.-J. (2022). Acid and rennet coagulation properties of A2 milk. *Foods,* 11(22), Article 3648. https://doi.org/10.3390/foods11223648
12. Abd El-Sal, B.A.E.-Y., El-Hamid Ibrahim, O.A., El-Sayed, H.A.E.-R. (2017). Purification and characterization of milk coagulation enzyme from artichoke (*Cynara carduncul*us L.) flowers as coagulant on white soft cheese. *International Journal of Dairy Science*, 12, 254–265. https://doi.org/10.3923/ijds.2017.254.265
13. Feijoo-Siota, L., Villa, T. G. (2011). Native and biotechnologically engineered plant proteases with industrial applications. *Food and Bioprocess Technology*, 4(6), 1066–1088. https://doi.org/10.1007/s11947-010-0431-4
14. Li, Q., Zhao, Z. (2019). Acid and rennet-induced coagulation behaviour of casein micelles with modified structure. *Food Chemistry*, 291, 231–238. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.04.028
15. Alzahrani, E., Alkhudaidy, A.T. (2020). Eco-friendly production of metal nanoparticles immobilised on organic monolith for pepsin extraction. *Polish Journal of Chemical Technology*, 22(1), 18–28. https://doi.org/10.2478/pjct-2020-0004

16. Cupp-Enyard, C. (2008). Sigma's non-specific protease activity assay — Casein as a substrate. *Journal of Visualized Experiments,* 19, Article 899. https://doi.org/10.3791/899
17. Salelles, L., Floury, J., Le Feunteun, S. (2021). Pepsin activity as a function of pH and digestion time on caseins and egg white proteins under static *in vitro* conditions. *Food and Function*, 12(24), 12468–12478. https://doi.org/10.1039/d1fo02453a
18. Abdi, H., Williams, L. J. (2010). Tukey's honestly significant difference (HSD) test. *Encyclopedia of Research Design*, 3(1), 583–585.
19. R Core Team. (2023). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. Retrieved from https://www.R-project.org/ Accessed July 12, 2025
20. Mendiburu, F. (2023). Agricolae: Statistical procedures for agricultural research (Version 1.3–7) [R package]. Retrieved from https://CRAN.R-project.org/package=agricolae Accessed July 12, 2025
21. Baba, W. N., Baby, B., Mudgil, P., Gan, C. -Y., Vijayan, R., Maqsood, S. (2021). Pepsin generated camel whey protein hydrolysates with potential antihypertensive properties: Identification and molecular docking of antihypertensive peptides. *LWT*, 143, Article 111135. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111135
22. Legg, A.K., Carr, A.J., Bennet, R.J., Johnston, K.A. (2017). Cheese General Aspects of Cheese Technology. Chapter in a book: Cheese. Academic Press, 2017. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-417012-4.00026-0
23. Yang, M., Yang, Z., Everett, D. W., Gilbert, E. P., Singh, H., Ye, A. (2025). Digestion of food proteins: The role of pepsin. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 65(30), 6919–6940. https://doi.org/10.1080/10408398.2025.2453096
24. Ravindran, V., Abdollahi, M. R. (2021). Nutrition and digestive physiology of the broiler chick: State of the art and outlook. *Animals*, 11(10), Article 2795. https://doi.org/10.3390/ani11102795
25. Huppertz, T., Chia L. W. (2021). Milk protein coagulation under gastric conditions: A review. *International Dairy Journal,* 113, Article 104882. https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2020.104882
26. Salvador, D., Acosta, Y., Zamora, A., Castillo, M. (2022). Rennet-induced casein micelle aggregation models: A review. *Foods*, 11(9), Article 1243. https://doi.org/10.3390/foods11091243
27. Konuspayeva, G., Faye B. (2021). Recent advances in camel milk processing. *Animals*, 11(4), Article 1045. https://doi.org/10.3390/ani11041045
28. Mazloomi, S. N., Mahoonak, A. S., Mora, L., Ghorbani, M., Houshmand, G., Toldrá, F. (2021). Pepsin hydrolysis of orange by-products for the production of bioactive peptides with gastrointestinal resistant properties. *Foods*, 10(3), Article 679. https://doi.org/10.3390/foods10030679
29. Morellon-Sterling, R., Tavano, O., Bolivar, J. M., Berenguer-Murcia, Á., Vela-Gutiérrez, G., Sabir, J. S. M. et al. (2022). A review on the immobilization of pepsin: A Lys-poor enzyme that is unstable at alkaline pH values. *International Journal of Biological Macromolecules*, 210, 682–702. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.04.224
30. Li, S., Pan, Z., Ye, A., Cui, J., Dave, A., Singh, H. (2022). Structural and rheological properties of the clots formed by ruminant milks during dynamic *in vitro* gastric digestion: Effects of processing and species. *Food Hydrocolloids,* 126, Article 107465. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.107465
31. He, X., Yang, M., Yuan, F., Singh, H., Ye, A. (2022). High-pressure processing of bovine milk: Effects on the coagulation of protein and fat globules during dynamic in vitro gastric digestion. *Current Research in Food Science,* 5, 1530–1538. https://doi.org/10.1016/j.crfs.2022.09.006
32. Gemechu, A., Gumi, B., Girma, S., Ayana, Z., Goshu, G. (2023). Efficiency of cheese making from camel milk by blending with cow milk at different proportion. *Asian Journal of Research in Animal and Veterinary Sciences,* 6, 174–182. https://doi.org/10.9734/ajravs/2023/v6i2244
33. Boukria, O., El Hadrami, E.M., Sultanova, S., Alqurashi, R.M., Cahyana, Y., Aït-Kaddour, A. (2023). Monitoring molecular structure changes of cow and camel milk mixtures during coagulation: A study based on TPA and 2DCOS-MIR spectroscopy. *Chemosensors*, 11(3), Article 178. https://doi.org/10.3390/chemosensors11030178
34. Mbye, M., Ayyash, M., Mohamed, H., Abu-Jdayil, B., Kamleh, R., Kamal-Eldin, A. (2023). Effects of ultrafiltration followed by heat or high-pressure treatment on camel and bovine milk cheeses. *NFS Journal*, 31, 123–132. https://doi.org/10.1016/j.nfs.2023.04.004
35. Abbaschian, S., Ramezan, Y., Salami, M. (2023). Chemical, textural and ripening characteristics of semi-hard white cheese prepared from camel milk using camel chymosin and different starter cultures. *Agricultural Research*, 12, 325–338. https://doi.org/10.1007/s40003-023-00654-x
36. Razi, S.M., Mohebbi, M., Mirzababaee, S.M., Hesarinejad, M.A., Movahed, M.K. (2024). The effect of high hydrostatic pressure on the structure of whey proteins-guar mixture. *Heliyon*, 10(1), Article e24140. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e24140
37. Houssou, H., Labiod, A., Ramdani, A., Khenenou, T. (2023). Dairy production in the indigenous Arbia goat breed and growth performance of their kids in Algeria. *Veterinarska Stanica*, 54(5), 531–540. https://doi.org/10.46419/vs.54.5.4
38. Abdalla, A., Abu-Jdayil, B., AlMadhani, S., Hamed, F., Kamal-Eldin, A., Huppertz, T. et al. (2022). Low-fat akawi cheese made from bovine-camel milk blends: Rheological properties and microstructural characteristics. *Journal of Dairy Science*, 105(6), 4843–4856. https://doi.org/10.3168/jds.2021-21367
39. Felfoul, I., Bouazizi, A., Tourki, I., Guesmi, C., Attia, H. (2022). Effect of storage conditions on physicochemical, sensory, and structural properties of dromedary and cow's skim milk soft-brined cheese. *Journal of Food Processing and Preservation*, 45, Article e15970. https://doi.org/10.1111/jfpp.15970
40. Kaczynski, K.Ł., Cais-Sokolinska, D., Bielska, P., Teichert, J., Biegalski, J., Yigit, A. et al. (2023). The influence of the texture and color of goat's salad cheese on the emotional reactions of consumers compared to cow's milk cheese and Feta cheese. *European Food Research and Technology*, 249, 1257–1272. https://doi.org/10.1007/s00217-023-04211-2
41. Bouazizi, A., Touati, T.B., Guesmi, C., Attia, H., Felfoul, I. (2021). Physicochemical, sensory and coagulation properties of dromedary and cows' skim milk white brined cheeses. *International Dairy Journal,* 117, Article 105006. https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2021.105006
42. Bouras, B., Aissaoui-Zitoun, O., Benyahia, F.A., Djema, S., Bouras, L., Zidoune, M.N. et al. (2025). Effect of freeze-dried camel rennet extract on coagulation of camel-goat milk mixture and characterization of the cheese obtained. *Foods*, 14(3), Article 334. https://doi.org/10.3390/foods14030334
43. Batool, A., Ul Haq, F., Ali, K., Khalid, M.U., Zafar, U., AL-Ansi, W. (2024). Development of camel milk soft cheese with different levels of salt, fat and solid not fat. *International Journal of Environment, Agriculture and Biotechnology*, 9, 114–124. https://doi.org/10.22161/ijeab.96.16
44. Najera, A. I., de Renobales, M. Barron, L. J. R. (2003). Effects of pH, temperature, $CaCl_2$ and enzyme concentrations on the rennet-clotting properties of milk: A multifactorial study. *Food Chemistry*, 80(4), 505–514. https://doi.org/10.1016/S0308-8146(02)00270-4
45. Lucey, J.A. (2002). Formation and physical properties of milk protein gels. *Journal of Dairy Science*, 85(2), 281–294. https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(02)74078-2

AUTHOR INFORMATION	СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ
Affiliation	**Принадлежность к организации**
Djilali Bouhadi, Professor, Laboratory of Bioconversion, Microbiology Engineering and Health Safety, University of Mustapha Stambouli of Mascara Boîte Postale 305, Route Mamounia, 29000 Mascara, Algeria E-mail: bouhadidjilali@yahoo.fr ORCID: http://orcid.org/0000-0002-1145-8186 * corresponding author	**Бухади Джилали** — Профессор, Лаборатория биоконверсии, микробиологической инженерии и охраны здоровья, Маскарский Университет Мустафы Стамбула П/я 305, Мамуния Роуд, 29000 Маскара, Алжир E-mail: bouhadidjilali@yahoo.fr ORCID: http://orcid.org/0000-0002-1145-8186 * автор для контактов
Hamza Belkhodja, Associate Professor, Laboratory of Bioconversion, Microbiology Engineering and Health Safety, University of Mustapha Stambouli of Mascara Boîte Postale 305, Route Mamounia, 29000 Mascara, Algeria E-mail: hamzabelkhodja@yahoo.fr ORCID: http://orcid.org/0000-0002-1937-2897	**Белходжа Хамза** — доцент, Лаборатория биоконверсии, микробиологической инженерии и охраны здоровья, Маскарский Университет Мустафы Стамбула П/я 305, Мамуния Роуд, 29000 Маскара, Алжир. E-mail: hamzabelkhodja@yahoo.fr ORCID: http://orcid.org/0000-0002-1937-2897
Abdelkader Elouissi, Professor, Biological Systems and Geomatics Research Laboratory (LRSBG), University Mustapha Stambouli of Mascara Boîte Postale 305, Route Mamounia, 29000, Mascara, Algeria E-mail: aekelouissi@yahoo.fr ORCID: http://orcid.org/0000-0002-6647-7042	**Элуисси Абделькадер** — Профессор, Лаборатория исследований биологических систем и геоматики (LRSBG), Маскарский Университет Мустафы Стамбула, П/я 305, Мамуния Роуд, 29000 Маскара, Алжир E-mail: aekelouissi@yahoo.fr ORCID: http://orcid.org/0000-0002-6647-7042
Zouaoui Benattouche, Professor, Laboratory of Bioconversion, Microbiology Engineering and Health Safety, University of Mustapha Stambouli of Mascara Boîte Postale 305, Route Mamounia, 29000 Mascara, Algeria E-mail: benattouche_22@yahoo.fr ORCID: http://orcid.org/0000-0002-1937-1894	**Бенаттуш Зуауи** — Профессор, Лаборатория биоконверсии, микробиологической инженерии и безопасности здоровья, Маскарский Университет Мустафы Стамбула П/я 305, Мамуния Роуд, 29000 Маскара, Алжир Email: benattouche_22@yahoo.fr ORCID: http://orcid.org/0000-0002-1937-1894
Abderrahmane Remil, Associate Professor, Laboratory of Organic, Macromolecular Chemistry and Materials, University of Mustapha Stambouli of Mascara Boîte Postale 305, Route Mamounia, 29000 Mascara, Algeria Email: remilabderrahmane2@gmail.com ORCID: http://orcid.org/0009-0006-1694-8711	**Ремил Абдеррахман** — доцент, Лаборатория органической, макромолекулярной химии и материалов, Маскарский Университет Мустафы Стамбул П/я 305, Мамуния Роуд, 29000 Маскара, Алжир E-mail: remilabderrahmane2@gmail.com ORCID: http://orcid.org/0009-0006-1694-8711
Ahmed Hariri, Professor, Laboratory of Bioconversion, Microbiology Engineering and Health Safety, University of Mustapha Stambouli of Mascara Boîte Postale 305, Route Mamounia, 29000 Mascara, Algeria E-mail: haririahmed@yahoo.fr ORCID: http://orcid.org/0000-0003-0594-6834	**Харири Ахмед** — Профессор, Лаборатория биоконверсии, микробиологической инженерии и охраны здоровья, Маскарский Университет Мустафы Стамбула П/я 305, Мамуния Роуд, 29000 Маскара, Алжир E-mail: haririahmed@yahoo.fr ORCID: http://orcid.org/0000-0003-0594-6834

Contribution	Критерии авторства
Authors equally relevant to the writing of the manuscript, and equally responsible for plagiarism.	Авторы в равных долях имеют отношение к написанию рукописи и одинаково несут ответственность за плагиат.

Conflict of interest	Конфликт интересов
The authors declare that there is no conflict of interest.	Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

DOI: https://doi.org/10.21323/2618-9771-2026-9-2-261-269

Поступила 13.02.2026
Поступила после рецензирования 01.06.2026
Принята в печать 04.06.2026
© Посокина Н. Е., Захарова А. И., 2026

https://www.fsjour.com/jour
Обзорная статья
Открытый доступ

СОВРЕМЕННЫЕ ПРЕПАРАТЫ БИОТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ПИЩЕВЫХ СИСТЕМ

Посокина Н. Е.*, Захарова А. И.

Всероссийский научно-исследовательский институт технологии консервирования, Видное, Московская область, Россия

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:
каприловая кислота, лимонная кислота, надуксусная кислота, лизоцим, глюконо-дельта-лактон, натамицин, хитозан, низин

АННОТАЦИЯ

В современной пищевой индустрии наблюдается тенденция к росту спроса на продукты с минимальной технологической обработкой. Покупатели все активнее выбирают минимально обработанные продукты питания, поскольку их употребление приносит значительную пользу для здоровья. Это явление обусловлено ростом потребительского интереса к здоровому питанию. Ключевая ценность таких продуктов определяется высоким содержанием пищевых волокон, макро- и микроэлементов, а также биологически активных соединений. Сохранение качества продуктов с минимальной обработкой в процессе хранения представляет собой серьезную задачу. Например, будучи скоропортящимися, фрукты и овощи в редких случаях способны сохранять качество при комнатной температуре, что вынуждает производителей разрабатывать эффективные методы сохранения их свежести и питательной ценности. При промышленной переработке даже минимальные технологические операции инициируют биохимические процессы, негативно влияющие на сохранность продукции. Эти процессы запускают нежелательные изменения: продукты начинают темнеть, активнее выделяют этилен, повышается интенсивность дыхания, возникает риск развития вредных микроорганизмов. Все эти процессы снижают товарный вид, пищевую ценность и срок годности продукции. Поскольку люди все чаще выбирают натуральную еду, становится особенно важно находить безопасные способы сохранения продуктов. В условиях ужесточения нормативных требований особую актуальность приобретает разработка органических консервантов и создание рецептур с маркировкой «чистая этикетка», предполагающей минимальный состав и отсутствие синтетических добавок. Оптимизация сохранности минимально обработанных пищевых продуктов представляет собой комплексную научно-технологическую задачу, требующую интеграции знаний из области пищевой химии, микробиологии и биотехнологии. В современных условиях наиболее перспективной стратегией выступает синергетическое комбинирование различных классов биологически активных соединений, включающих ферментные ингибиторы, антимикробные пептиды, природные эфирные масла, органические кислоты и синтезированные биоциды с установленным профилем безопасности. Такой подход базируется на принципе создания многоуровневых барьерных систем, где каждый компонент вносит вклад в подавление ключевых механизмов порчи, микробной контаминации, окислительных реакций и ферментативной деградации. Рациональное комбинирование биотехнологических веществ и природных соединений формирует методологическую основу для создания инновационных решений в области сохранности пищевых продуктов. Данный подход не только отвечает современным требованиям к натуральности и безопасности, но и открывает перспективы для разработки продуктов с увеличенными сроками годности при сохранении их пищевой ценности и потребительских свойств. Целью данного обзора являлось рассмотрение современных биотехнологических препаратов и методов их применения для улучшения качества и продления срока годности пищевых продуктов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Исследования проводились в рамках государственного задания ФГБНУ «ФНЦ пищевых систем им. В.М. Горбатова».

Received 13.02.2026
Accepted in revised 01.06.2026
Accepted for publication 04.06.2026
© Posokina N. E., Zakharova A. I. 2026

Available online at https://www.fsjour.com/jour
Review article
Open access

MODERN BIOTECHNOLOGICAL SUBSTANCES FOR FOOD SYSTEM PROCESSING

Natalia E. Posokina*, Anna I. Zakharova

All-Russian Scientific Research Institute of Preservation Technology, Vidnoe, Moscow region, Russia

KEYWORDS:
caprylic acid, citric acid, peracetic acid, lysozyme, glucono-delta-lactone, natamycin, chitosan, nisin

ABSTRACT

The modern food industry is seeing a growing demand for minimally processed foods. Consumers are increasingly choosing minimally processed foods because of their significant health benefits. This trend is driven by growing consumer interest in healthy eating. The key value of such products lies in their high content of dietary fiber, macro- and micronutrients, and bioactive compounds. Maintaining the quality of minimally processed foods during storage is a significant challenge. For example, fruits and vegetables, being perishable, rarely retain their quality at room temperature, forcing producers to develop effective methods for preserving their freshness and nutritional value. During industrial processing, even minimal technological operations initiate biochemical processes that negatively impact product shelf life. These processes trigger undesirable changes: products begin to darken, produce increased ethylene, respire more rapidly, and develop the risk of harmful microorganism growth. All of these processes reduce the product's presentation, nutritional value, and shelf life. As people increasingly choose natural foods, finding safe ways to preserve food is becoming increasingly important. In the face of increasingly stringent regulatory requirements, the development of organic preservatives and clean-label formulations, which require minimal ingredients and the absence of synthetic additives, is becoming increasingly important. Optimizing the shelf life of minimally processed foods is a complex scientific and technological challenge that requires the integration of knowledge from food chemistry, microbiology, and biotechnology. Under current conditions, the most promising strategy is the synergistic

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: **Посокина, Н. Е., Захарова, А. И.** (2026). Современные препараты биотехнологического происхождения для обработки пищевых систем. *Пищевые системы*, 9(2), 261–269. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2026-9-2-261-269

FOR CITATION: **Posokina, N. E., Zakharova, A. I.** (2026). Modern biotechnological substances for food system processing. *Food Systems,* 9(2), 261–269. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2026-9-2-261-269

combination of various classes of biologically active compounds, including enzyme inhibitors, antimicrobial peptides, natural essential oils, organic acids, and synthetic biocides with an established safety profile. This approach is based on the principle of creating multi-layered barrier systems, where each component contributes to the suppression of key spoilage mechanisms, microbial contamination, oxidative reactions, and enzymatic degradation. The rational combination of biotechnological substances and natural compounds forms a methodological basis for the development of innovative food preservation solutions. This approach not only meets modern requirements for naturalness and safety but also opens up prospects for developing products with extended shelf lives while maintaining their nutritional value and consumer properties. The purpose of this review was to examine modern biotechnological products and methods for their application to improve the quality and extend the shelf life of food products.

FUNDING: The article was published as part of the research topic No. FGUS-2024-0004 of the state assignment of the V. M. Gorbatov Federal Research Center for Food Systems of RAS.

1. Введение

Покупатели все чаще отказываются от переработанных товаров в пользу продуктов, прошедших минимальную обработку. Это обусловлено растущим запросом на сохранение нутриентов и нехваткой времени для самостоятельной кулинарной обработки сырья [1–3]. Потребители осознают, что щадящие технологии позволяют оставить в продукте витамины, клетчатку и биоактивные соединения, играющие важную роль в профилактике метаболических и сердечно-сосудистых заболеваний [4–7]. Параллельно многие традиционные синтетические добавки попадают под ограничения, а ритейлеры и покупатели требуют маркировки «clean label». В результате производители вынуждены заменять химические консерванты на соединения природного или биотехнологического происхождения [8]. Простое замещение редко обеспечивает нужный срок годности, поэтому индустрия переходит к комбинированным схемам: ферменты, бактериоцины и органические кислоты применяют вместе с физико-технологическими приемами (УФ-обработка, ультразвук, модифицированная атмосфера, мягкий нагрев). Главный технический барьер при масштабировании таких решений заключается не в подборе концентрации, а в предсказуемости взаимодействия активных веществ с белково-жировыми и углеводными матрицами продукта. В данном обзоре систематизированы актуальные данные по применению биотехнологических консервантов на этапе первичной переработки сырья. Проведен сравнительный анализ их технологической совместимости, производственного ограничения и соответствия нормативным требованиям. На основе собранной информации сформулированы рекомендации по адаптации этих решений в промышленных рецептурах и обозначены направления, требующие дальнейших экспериментальных исследований.

2. Материалы и методы

Объектами исследования являлись нормативные документы и научные публикации отечественных и зарубежных авторов по теме современных биотехнологических методов обработки сырья. Данные собирались с помощью платформ eLibrary.ru, Scopus, ResearchGate, а также открытых интернет-ресурсов. При поиске публикаций применялись различные комбинации ключевых слов: *каприловая кислота, лимонная кислота, лизоцим, надуксусная кислота, глюконо-дельта-лактон, натамицин, хитозан, низин*. На этапе отбора исключались материалы без доступных полных текстов научных работ. Основная часть проанализированных публикаций охватывает периоды с 2021 по 2025 годы.

3. Каприловая кислота

Каприловая кислота (октановая кислота) — натуральная насыщенная жирная кислота, которая встречается в кокосовом и пальмовом маслах, а также в молоке некоторых млекопитающих. В пищевой промышленности она используется как безопасный консервант (Е 295). Каприловая кислота помогает продлевать срок годности продуктов, препятствуя росту вредных микроорганизмов (бактерий, грибков и плесеней). Антимикробные свойства кислоты нарушают целостность клеточных мембран патогенных микроорганизмов, замедляя их размножение. В отличие от синтетических консервантов каприловая кислота не придает постороннего привкуса и не меняет основные органолептические показатели продуктов. Кроме того, она устойчива при умеренном нагревании и хорошо совмещается с другими натуральными ингредиентами. Таким образом, каприловая кислота выступает эффективной и безопасной альтернативой химическим консервантам, она позволяет увеличить срок хранения пищевых продуктов, сохраняя их качество. В пищевой отрасли каприловую кислоту чаще всего применяют при производстве молочной продукции и кондитерских изделий [9,10]. В исследовании [11] изучалась эффективность покрытий на основе пектина с добавлением каприловой кислоты и других фитохимических веществ для снижения содержания сальмонеллы в куриных яйцах. Было обнаружено, что комбинация пектина с каприловой и капроновой кислотами и куминальдегидом (каждый по 0,5 %) наиболее эффективна для снижения количества бактерий. Бактерицидный эффект обусловлен липофильностью молекулы. В недиссоциированной форме кислота проникает через цитоплазматическую мембрану, вызывая внутриклеточный ацидоз и нарушая метаболизм патогенов. Оптимальная антимикробная активность достигается при pH < 5,5, когда преобладает неионизированная фракция, способная диффундировать в клетку [12–15]. В отличие от сильных синтетических консервантов, каприловая кислота не искажает органолептический профиль продукта, термостабильна в диапазоне пастеризационных температур и совместима с гидроколлоидными системами. В исследовании [16] изучали бактерицидную активность каприловой и лимонной кислот в отношении патогенного штамма *Escherichia coli* O157: H7 и естественной микробиоты свежего непастеризованного морковного сока. Экспериментальная обработка продукта осуществлялась посредством комбинированного применения каприловой и лимонной кислот при умеренно повышенной температуре. В ходе эксперимента тестировались растворы кислот в концентрации 5,0 мМ каждой при экспозиции 5 мин и температуре 50 °C. Полученные результаты продемонстрировали эффективность предложенного метода, который привел к снижению популяции *E. coli* O157: H7 и к уменьшению численности эндогенной микрофлоры. Помимо микробиологического эффекта, обработка оказала положительное влияние на органолептические показатели продукта. Также было отмечено улучшение цветовой характеристики сока. Результаты исследования показали перспективность применения низких концентраций каприловой и лимонной кислот в технологии обработки непастеризованного морковного сока. Данный подход обеспечивает эффективное снижение микробной обсемененности продукта при сохранении его качественных характеристик.

4. Лимонная кислота

Лимонная кислота представляет собой природную органическую кислоту, широко распространенную в растительном мире. Она содержится в значительных количествах в цитрусовых, а также в ананасах, клюкве, гранатах, табачных и хвойных растениях. В пищевой промышленности лимонная кислота зарегистрирована под кодом Е 330 и широко используется в качестве пищевой добавки при производстве разнообразной продукции. Например, ее применяют в процессе изготовления безалкогольных напитков, кондитерских изделий, консервированных продуктов, а также сухих пищевых смесей [17,18]. Благодаря своим химическим свойствам лимонная кислота в составе пищевых продуктов выполняет ряд значимых технологических функций. Прежде всего, она выступает эффективным регулятором кислотности. Понижая pH среды, она помогает сбалансировать вкусовой профиль продукта, что представляет особую ценность при производстве газированных и фруктовых напитков, кондитерских изделий (джемов, мармеладов, конфитюров), майонезов и соусов. Также лимонная кислота проявляет свойства хелатирующего агента. Она образует стабильные координационные соединения с ионами металлов, катализирующих окислительные реакции. Подавляя процессы окисления жиров и пигментов, она способствует сохранению органолептических характеристик и пищевой ценности продуктов [19,20]. Одновременно с этим лимонная кислота действует как консервант. Снижение pH ингибирует пролиферацию широкого спектра патогенных микроорганизмов, включая бактериальные клетки, дрожжевые культуры и плесневые грибы, что объективно способствует увеличению сроков годности пищевой продукции. Исследования подтверждают, что в кислой среде замедляется активность ферментов, ответственных за порчу продуктов [21,22].

Процесс закисления, индуцируемый введением лимонной кислоты, имеет принципиальное значение для увеличения продолжительности хранения пищевой продукции, в особенности скоропортящейся, к которой относятся фрукты, фруктовые соки и молочная продукция [23]. Кроме того, лимонная кислота проявляет синергический эффект в сочетании с другими консервантами, например, с бензоатами и сорбатами. Она усиливает их антимикробное действие, что позволяет снизить дозировки синтетических добавок [24]. Для применения в пищевой промышленности лимонная кислота как пищевая добавка прошла всестороннюю оценку безопасности (GRAS). Также для лимонной кислоты не установлено ограничений по величине допустимой суточной дозы, что свидетельствует о ее благоприятном профиле безопасности при использовании в регламентированных технологических дозировках [25,26]. Аналогичный статус GRAS присвоен и ряду производных соединений лимонной кислоты, разрешенных к применению в пищевой индустрии. В перечень таких соединений входят: цитрат кальция, цитрат железа, цитрат марганца, цитрат натрия, цитрат диаммония, изопропилцитрат калия и стеарилцитрат. Данный факт демонстрирует расширенные возможности применения химических модификаций лимонной кислоты в качестве пищевых добавок, подходящих с точки зрения безопасности для здоровья человека [27]. Обработка свежесрезанных ломтиков китайского водяного ореха, популярного азиатского продукта, 1 %-ным раствором хитозана в сочетании с лимонной кислотой привела к существенному снижению потери цветности. При применении раствора лимонной кислоты с молярной концентрацией 0,1 М зафиксировано увеличение срока годности продукта и сохранение его органолептических характеристик. Кроме того, отмечено ингибирование ферментативной активности полифенолоксидазы, ответственной за окислительные процессы, приводящие к потемнению растительной ткани [28]. Послеуборочное хранение черимойи (*Annona cherimola*) сопряжено с быстрым ухудшением качества: мякоть стремительно темнеет, теряет упругость и переходит в стадию перезревания. Исследования показали, что нанесение хитозанового покрытия с добавлением лимонной кислоты замедляет эти процессы. В течение минимум шести суток уровень микробиологической порчи в обработанных партиях оставался значительно ниже, чем в контрольной группе, а визуальный и органолептический анализ подтвердил сохранение товарного вида плодов [29]. Альтернативный подход заключается во встраивании лимонной кислоты в активную упаковку. За счет дозированной миграции соединения в поверхностный слой формируется локальная кислая среда, которая подавляет размножение патогенов и продлевает срок хранения без прямого контакта кислоты с продуктом [30]. В эксперименте [31] получили композитные пленки на основе хитозан-желатиновой смеси, обогащенные лимонной и аскорбиновой кислотами. Такое сочетание позволило совместить барьерные свойства полимера с усиленным антиоксидантным и антимикробным действием, что перспективно для упаковки скоропортящегося растительного сырья. Пленки продемонстрировали антимикробную активность против *S. aureus* при содержании 2 % лимонной кислоты и 2 % аскорбиновой кислоты. Таким образом, пленки с 2 % лимонной кислоты оказались перспективны для упаковки продуктов, подверженных заражению *S. aureus*. По сравнению с синтетическими аналогами лимонная кислота обладает рядом преимуществ. Она термостабильна и сохраняет свои свойства при нагревании до 175 °C, при этом, будучи биоразлагаемой, она не накапливается в окружающей среде. Лимонная кислота может быть получена биотехнологическим путем, например, посредством ферментации сахаросодержащих субстратов грибом *Aspergillus niger*, а при рекомендованных дозировках не искажает органолептические свойства продуктов [32]. Интеграция лимонной кислоты в рецептуры пищевых систем позволяет формировать локализованный кислотно-консервирующий барьер, минимизируя прямое внесение синтетических добавок. Сочетание хелатирующей активности, регуляции pH и ингибирования ферментативной деградации обеспечивает пролонгацию сроков годности. Применение лимонной кислоты позволяет улучшить органолептические характеристики продуктов, снизить потребность в синтетических консервантах, а также сохранить питательные свойства продуктов. Таким образом, лимонная кислота выступает многофункциональной пищевой добавкой, сочетающей эффективность, безопасность и натуральность.

5. Надуксусная кислота

Надуксусная кислота (НУК) применяется в пищевой промышленности в качестве высокоэффективного дезинфицирующего средства для обработки сырья и упаковочных материалов [33,34]. Противомикробное действие обусловлено окислением липидов и белков клеточных мембран, что обеспечивает инактивацию широкого спектра патогенов, включая грамположительные и грамотрицательные бактерии, в том числе *Listeria, Salmonella, E. coli,* дрожжи, грибы и споры. При этом НУК сохраняет активность в широком диапазоне температур (0–40 °C) и pH (3,0–7,5) [35,36]. Важным преимуществом НУК является ее способность разлагаться на безопасные компоненты (уксусную кислоту, воду и кислород), что обеспечивает отсутствие токсичных остатков на поверхности продукта. В промышленности НУК применяется для снижения микробной обсемененности тушек птицы, подавления образования биопленок, дезинфекции воды и санитарной обработки упаковки [37–39]. В исследовании [40] капусту кале обрабатывали НУК в концентрации 20 мг/л в комбинации с ультразвуком (50 кГц). Комбинированное воздействие ультразвука и НУК при температуре 35 °C обеспечило снижение аэробных мезофильных микроорганизмов на 2,4 log КОЕ/г, количество колиформных бактерий снизилось на 2,6 log КОЕ/г, а плесневых грибов и дрожжей — на 2,4 log КОЕ/г. При этом достигнутый уровень микробной обсемененности оставался стабильным в течение всего срока хранения. Важным преимуществом НУК является отсутствие негативного влияния на ключевые качественные характеристики продукта, такие как титруемая кислотность, потеря массы, содержание витамина С и фенольных соединений. НУК, особенно в сочетании с ультразвуком, выступает перспективной альтернативой, обеспечивая эффективное подавление патогенной микрофлоры без ущерба для пищевой ценности и органолептических свойств капусты кале.

Для готовых к употреблению овощных салатов, не подлежащих термообработке, эффективность НУК сравнивали с традиционной обработкой гипохлоритом натрия (ГН) [41–43]. Органолептический анализ показал, что уже к 15-м суткам хранения образцы, обработанные НУК, превосходили образцы, обработанные ГН, по сохранению товарного вида и отсутствию посторонних запахов. Это подтверждает целесообразность замены хлорсодержащих реагентов на НУК. В исследовании [44] оценивали антимикробную активность НУК и ее комбинацию с сернокислотным поверхностно-активным веществом (СПАВ) против *L. monocytogenes* на поверхности целых дынь. Все варианты обработки с НУК и НУК-СПАВ обеспечивали статистически значимое ($P < 0,05$) снижение численности *L. monocytogenes* по сравнению с обработкой проточной водой. Антимикробная активность комплекса НУК-СПАВ в целом соответствовала эффективности чистой НУК той же концентрации, однако в отдельных образцах наблюдалось полное подавление патогена.

Несколько исследований были посвящены вопросу воздействия НУК на *L. monocytogenes* на примере яблок. Было установлено, что антимикробная эффективность комбинации НУК + ЛАЭ возрастала с повышением концентрации компонентов и температуры обработки. Сочетание НУК (80 мг/кг) с лауриновой кислотой (ЛАЭ) (0,05 %) при температуре 46 °C оказалось наиболее эффективным и обеспечивало синергетический бактерицидный эффект. Так, 30- и 120-секундная экспозиции снижали популяцию патогена на 2,10 и на 2,58 log10 КОЕ/яблоко соответственно [45]. В другом исследовании [46] изучали обработку яблок НУК в комбинации с ультрафиолетовым излучением. Обработку проводили в течение 5 мин, это инактивировало *L. monocytogenes* до пределов обнаружения (3,30 log КОЕ/2000 мл и 2,0 log КОЕ/яблоко). После обработки НУК/УФ-излучением сохранялись цвет или твердость яблок ($p > 0,05$). Суммируя экспериментальные данные, можно утверждать, что НУК представляет собой технологически гибкий препарат для щадящей дезинфекции растительного сырья. Ее интеграция в физико-химические комбинированные протоколы позволит достигать заданных уровней микробиологической безопасности без деградации нутритивного и органолептического профиля, что соответствует современным требованиям к переработке.

6. Лизоцим

Лизоцим — природный фермент, обладающий выраженной бактерицидной активностью, который получил широкое распространение в пищевой промышленности в качестве натурального консерванта [47–49]. Этот фермент, широко распространенный в природе, особенно эффективен против грамположительных бактерий. Его консервирующее действие связано со способностью подавлять рост патогенных микроорганизмов, что позволяет существенно продлевать сроки годности пищевой продукции. Лизоцим применяется при производстве и хранении свежих овощей и фруктов, мясных изделий, морепродуктов, колбас, а также ряда полутвердых сыров. Активность фермента зависит от ряда факторов: pH, температуры, содержания солей и присутствия усиливающих веществ [50]. Хотя лизоцим изначально менее эффективен против грамотрицательных

бактерий, их чувствительность можно повысить с помощью специальных методов обработки [51,52]. Для усиления его действия в отношении данной группы микроорганизмов предложена комбинация с лактоферрином. В рамках эксперимента оба белка были включены в бумагу, содержащую карбоксиметилцеллюлозу, что обеспечило нековалентное связывание положительно заряженных белков. В процессе эксплуатации происходило контролируемое высвобождение белков, при этом они сохраняли исходные структурные и функциональные характеристики, включая антимикробную активность против ключевых пищевых патогенов.

Эксперименты с использованием бумаги, содержащей оба белка, выявили синергетический эффект при воздействии на листерии. Аналогичные исследования с тонкими ломтиками мяса, размещенными на бумаге с антимикробными белками, подтвердили высокую эффективность лизоцима против данных микроорганизмов [51]. Перспективным направлением является создание съедобных антимикробных покрытий на основе комплексов лизоцима с альгинатом натрия. Такие пленки демонстрируют избирательную активность в отношении микроорганизмов, чувствительных к лизоциму [53]. Усиление бактерицидной активности лизоцима сегодня достигается не за счет увеличения концентраций, а через направленную молекулярную настройку. Изменение поверхностного заряда, коррекция ионных характеристик и точечная модификация каталитических аминокислотных остатков позволяют ферменту эффективнее связываться с пептидогликановым слоем и липидными мембранами бактерий, ускоряя их лизис. Такие подходы формируют базу для новых антибактериальных систем с расширенным спектром действия, способных работать в сложных пищевых системах [54].

Одним из практических результатов стала разработка активной упаковки с интегрированным лизоцимом. В работе [55] описана наноэнзимная гидрогелевая пленка, объединяющая механическую защиту, антиоксидантные и антимикробные функции. Высокая прочность материала минимизирует микроповреждения фруктов при логистике, а встроенные УФ-фильтры и кислородный барьер тормозят окислительные реакции. Лабораторные испытания подтвердили подавление роста *Escherichia coli* и *Staphylococcus aureus,* при этом комплексное действие пленки замедляло микробную контаминацию и сохраняло свежесть фруктов за счет регулируемого газообмена. Лизоцим проявляет противомикробную активность, воздействуя на ограниченный спектр бактерий и грибов. При этом установлено, что активность данного фермента может существенно усиливаться в присутствии определенных химических соединений, в частности этилендиаминтетрауксусной кислоты и триполифосфата [56]. В исследовании [57] препарат лизоцимных пептидов, разработанный для расширения антимикробного спектра действия лизоцима, продемонстрировал выраженную антибактериальную эффективность в отношении ряда патогенных бактерий (*Escherichia coli, Salmonella enteritidis и видов Pseudomonas, при этом Salmonella typhi* и *Aeromonas hydrophila*). Его синергетическая комбинация с глицином и лимонной кислотой обеспечила ингибирование роста *E. coli* на уровне 6 log10 КОЕ/мл. Таким образом, препарат лизоцимных пептидов представляет собой перспективный натуральный нутрицевтический консервант пищевого происхождения, способный эффективно контролировать рост патогенных и вызывающих порчу микроорганизмов, что открывает возможности для его применения в качестве безопасной альтернативы химическим консервантам в пищевой промышленности.

7. Глюконо-дельта-лактон

Глюконо-дельта-лактон (ГДЛ) — мелкий белый кристаллический порошок, получаемый путем ферментативного окисления D-глюкозы, представляет собой нейтральный циклический эфир глюконовой кислоты. ГДЛ признан безопасным для здоровья (GRAS) и широко применяется в пищевой промышленности в качестве многофункциональной добавки к мясным, молочным, хлебобулочным, макаронным изделиям и сырам [58–61]. Обладая высокой растворимостью в воде, ГДЛ характеризуется способностью к медленному подкислению среды. Так, 1 г вещества способен снизить pH на 0,07–0,09 единицы, при этом в водном растворе он постепенно гидролизуется до глюконовой кислоты, обеспечивая плавное снижение уровня pH [62–64]. ГДЛ также используют в качестве консерванта и влагоудерживающего агента [65–68]. Антиоксидантная активность ГДЛ обусловлена способностью нейтрализовать свободные радикалы [69]. Также ГДЛ показал себя как эффективный коагулянт при производстве сыра и надежный консервант для широкого спектра пищевых продуктов [63]. В исследовании [70] изучали оптимальную дозу внесения ГДЛ в восстановленное молоко для получения мягкого кислотно-сычужного сыра. Количество ГДЛ составило 4 г/л, при этом получали конечный продукт, характеризующийся повышенным выходом и высокими органолептическими показателями. ГДЛ также используется в продуктах на основе сои, таких как темпе и тофу. В производстве темпе ГДЛ выступает в качестве подкислителя, сокращая длительность ферментации с 24–48 часов до 2–3 часов и снижая расход воды на подготовительных этапах. При изготовлении тофу ГДЛ выполняет функцию коагулянта, обеспечивающего равномерную текстуру, улучшенные органолептические характеристики и повышенный выход продукта за счет мягкого и контролируемого подкисления [71].

8. Натамицин

Натамицин применяется в пищевой промышленности в качестве противогрибкового консерванта широкого спектра. Основными микроорганизмами-продуцентами натамицина выступают штаммы *Streptomyces natalensis* и *Streptomyces chatanoogensis*. На стабильность натамицина влияет множество факторов, среди которых ключевую роль играют тип растворителя и pH среды, а также давление и температура. Низкая растворимость натамицина в водной среде обусловливает его преимущественную локализацию на поверхности обрабатываемых пищевых продуктов, при этом активное вещество не проникает вглубь продукта, что способствует сохранению его консервирующих свойств в течение продолжительного времени [72,73]. Он эффективен в отношении дрожжей и плесневых грибов, при этом не оказывает влияния на органолептические свойства продуктов. В таких продуктах, как сыры, колбасные изделия и йогурты, он эффективно предотвращает развитие нежелательной грибковой микрофлоры, не оказывая ингибирующего воздействия на процессы бактериальной ферментации. Помимо этого, натамицин используют в производстве фруктовых соков и вин, а также для поверхностной обработки с целью продления срока хранения и обеспечения микробиологической стабильности продукции [74]. Для подавления развития патогенной грибковой микрофлоры натамицин применяют в рамках комплексной послеуборочной обработки плодоовощного сырья [75]. Также натамицин снижает потери при хранении и продлевает сроки годности продукции без существенного изменения ее органолептических и биохимических характеристик [76]. Благодаря данным свойствам вещество получило одобрение к применению в качестве противогрибкового консерванта в большинстве стран мира и широко используется в сферах сельского хозяйства и здравоохранения [77,78]. В исследовании [79] экспериментальные данные показали выраженный положительный эффект обработки клубники раствором натамицина (концентрация 20 мг/л, выдержка 5 минут). После применение данной обработки не только эффективно замедлялось развитие плесени, но и снижалась интенсивность дыхательного обмена клубники, что способствовало продлению срока хранения. Применение натамицина в концентрации 0,01 % в процессе ферментации черных оливок в рассоле с массовой долей соли 8 % подавляло развитие дрожжей и плесневых грибов, при этом не оказывало ингибирующего воздействия на полезную микрофлору [80]. Также было установлено, что внесение натамицина в оливковую пасту в дозе 350 мкг/г существенно снижает вероятность развития гриба *Aspergillus ochraceus*, а также приводит к сокращению выработки пенициллиновой кислоты на 96 % [81]. Исследование [82] показало, что обработка ягод шелковицы раствором натамицина (0,3 г/л) способствовала снижению скорости деградации на 23,3 % к 10-му дню хранения, подавлению активности ферментов и уменьшению концентрации малонового диальдегида. Несмотря на снижение содержания фенольных соединений, моносахаридов (глюкозы и фруктозы) и антоцианов, применение натамицина позволяет поддерживать стабильный уровень растворимых сухих веществ и концентрации сахарозы, а также сохранять ключевые органолептические показатели на протяжении всего периода хранения. Полученные данные в ходе исследования [83] показали выраженное ингибирующее влияние натамицина на вегетативный рост *Botrytis cinerea* и *Penicillium expansum*. Применение рабочего раствора натамицина с концентрацией 100 мг/л позволило полностью подавить проявление серой гнили на ягодах винограда. Это подтверждает перспективность внедрения данного вещества в состав интегрированных систем обработки растений [84]. Результаты исследования [85] свидетельствуют о высокой эффективности комбинированного применения натамицина с флудиоксонилом либо пропиконазолом. Синергетическое взаимодействие указанных соединений обеспечило снижение риска развития зеленой плесени и серой гнили более чем на 85 % и существенно сократило уровень послеуборочной порчи цитрусовых культур. В исследовании [86] было установлено, что комбинированная обработка ягод ежевики феруловой кислотой и натамицином способ-

ствует ингибированию ключевых метаболических процессов. Также отмечалось ослабление интенсивности дыхательных процессов, что поспособствовало существенному увеличению срока хранения свежих ягод. При производстве напитков оптимальная концентрация натамицина, рекомендованная для введения на различных этапах производственного процесса напитков, варьируется в диапазоне от 10 до 50 мг/л. В ходе хранения фруктовых соков натамицин демонстрирует способность не только контролировать микробную обсемененность, но и косвенно поддерживать их антиоксидантный статус. На примере яблочного сока экспериментально подтверждено, что внесение препарата позволило сохранить исходные биоактивные характеристики вплоть до конца заявленного срока годности [87–89]. Эти данные обосновывают технологическое применение натамицина в индустрии напитков как компонента, продлевающего стабильность продукта без ущерба для его антиоксидантного потенциала.

9. Хитозан

Хитозан — природный полисахарид, получаемый из хитина, который в пищевых технологиях ценится за выраженную антимикробную активность и способность индуцировать защитные реакции в растительных тканях [90,91]. При нанесении на поверхность сырья полимер образует полупроницаемое покрытие, которое ограничивает транспирацию, формирует локальную модифицированную газовую среду (снижая интенсивность дыхания) и физически препятствует адгезии спор фитопатогенов. Совокупное действие этих механизмов тормозит развитие гнилостных процессов и позволяет увеличить продолжительность хранения без применения синтетических фунгицидов [92]. Продолжительность срока годности после обработки зависит от дозировки вещества и характеристик используемого растительного сырья. При этом относительно низкие дозы хитозана находят практическое применение в качестве натурального консерванта для фруктов [93]. Хитозан применяется в качестве основы для разработки комплексных функциональных пищевых добавок, включающих в себя витамины и минеральные компоненты, что позволяет использовать его биополимерные свойства для целенаправленного обогащения продукта биологически активными веществами [94]. Кроме того, хитозан может применяться в качестве съедобного покрытия для растительных объектов, которое эффективно замедляет процессы созревания, снижает естественную убыль массы при хранении и подавляет микробную обсемененность поверхности, тем самым способствуя продлению срока годности продукции без потери качественных характеристик [95,96]. В исследовании [97] хитозановое покрытие с концентрацией 0,5% стимулировало антиоксидантную ферментативную активность черешни на протяжении 24 суток при температуре хранения 10 °C. Применение комбинированного хитозан-желатинового покрытия позволило увеличить срок хранения черешни приблизительно на 10 суток относительно необработанных образцов в условиях низкотемпературного режима (0 °C). При этом включение натамицина в хитозановое покрытие привело к выраженному снижению численности дрожжевых и плесневых грибов, что способствовало замедлению микробиологической порчи и продлению сроков годности [98]. На примере папайи была проведена двухэтапная обработка, которая включала в себя предварительное погружение в раствор аскорбиновой кислоты с последующим нанесением хитозановой пленки [99]. Такой подход достоверно повышал суммарную антиоксидантную емкость мякоти, тормозил окислительные процессы и минимизировал потерю сахаров и пигментов на всем протяжении хранения. Схожие данные, подтверждающие синергию витамина С и полисахаридной матрицы, получены в работах [100–102]. Аналогичная логика применяется и к минимально переработанному манго. При тестировании водных растворов хитозана (0; 0,5; 1; 2%) фрукты фасовали в ПВХ-лотки и выдерживали при температуре 6 °C. Партии с полимерным покрытием сохраняли более высокую титруемую кислотность, а также стабильные уровни растворимых сухих веществ и аскорбиновой кислоты по сравнению с контрольными образцами. Хитозановая пленка выступает надежным инструментом для сохранения органолептических и биохимических показателей минимально переработанных фруктов [103].

В исследовании [104] для повышения эффективности защиты фруктов изучался метод послойного нанесения биополимерных покрытий. В ходе эксперимента сравнивали эффективность 1% раствора хитозана и полиэлектролитных комплексов, построенных на комбинациях хитозана с 1,5% альгинатом, 1% гидроксипропилметилцеллюлозой и 0,2% камедью рожкового дерева. Все многослойные варианты улучшали сохранность мандаринов, однако максимальный эффект показала комбинация гидроксипропилметилцеллюлозы и хитозана, которая лучше удерживала влагу и замедляла деградацию поверхностных тканей. Авторами [105] был разработан вариант съедобного покрытия на основе хитозана и карбоксиметилцеллюлозы натрия (LbL). Фрукты обрабатывали экспериментальным LbL-покрытием и традиционным однослойным хитозановым покрытием. Образцы хранили в течение 10 дней при температуре 13 °C и относительной влажности воздуха 80–85%. LbL-покрытие оказало выраженное положительное влияние на сохранность фруктов. Оно также способствовало повышению блеска поверхности и твердости, при этом обеспечивало более высокое содержание титруемой кислоты и аскорбиновой кислоты по сравнению с контрольными образцами. Кроме того, применение LbL-покрытия позволило снизить потерю массы плодов после хранения примерно на 0,8%. В исследовании [106] в качестве съедобного покрытия применялся 2%-ный раствор хитозана, обогащенный экстрактами кожуры *Citrus limon* и экстрактами листьев *Ocimum tenuiflorum*. В ходе проведенного исследования было установлено, что обработка бананов съедобным покрытием способствовала увеличению антиоксидантной активности, содержания аскорбиновой кислоты, растворимых сухих веществ и фенольных соединений по сравнению с контрольными образцами.

10. Низин

Изначально низин рассматривался как природное антимикробное соединение и потенциальный антибиотик, однако дальнейшие исследования выявили существенные ограничения его применения в этой области из-за низкой растворимости в воде. В 1950-х годах была доказана эффективность низина как пищевого консерванта, так как он успешно предотвращал порчу плавленого сыра, вызываемую клостридиями [107]. В настоящее время низин применяется в пищевой промышленности и входит в состав разнообразных продуктов, таких как молочные изделия, десерты, переработанное мясо, рыба, фруктовые соки и напитки, консервированные супы и овощи [108]. В сочетании с другими технологическими приемами он может выступать как дополнительный консервант. В консервированных продуктах низин применяют совместно с термической пастеризацией для эффективного подавления термостойких спор термофильных бактерий, провоцирующих кислотную порчу. Низин демонстрирует высокую антимикробную активность в отношении грамположительных бактерий, включая *Bacillus cereus*, *Listeria monocytogenes*, энтерококки, стафилококки и стрептококки [107,109]. Для консервирования пищевых продуктов с применением низина возможно реализовать несколько технологических стратегий, таких как инокуляция пищевых матриц штаммом микроорганизмов, продуцирующим низин, или использование его в качестве ингредиента ферментированного продукта, содержащего штамм-продуцент низина. Также практикуется внесение очищенного либо полуочищенного низина непосредственно в качестве консервирующего агента. Перспективным подходом выступает применение инкапсулированного низина либо его фиксация в твердых матрицах, что позволяет контролировать кинетику высвобождения активного вещества и обеспечивать его защиту от деградации под действием протеолитических ферментов [110]. В исследовании [111] изучали оптимизацию дозировок низина и концентрацию соли для эффективной термической инактивации *L. monocytogenes* при приготовлении говяжьего фарша, маринованного в соусе чипотле методом су-вид. Было установлено, что комбинация 120 МЕ низина и 0,4% соли при термической обработке при температуре 63 °C способствовала повышению чувствительности клеток *L. monocytogenes* к летальному воздействию тепла, тем самым обеспечивая безопасность конечного продукта. В исследовании [112] изучалось влияние съедобных покрытий на основе зеина и композиции зеина с низином на сохранение качественных характеристик яблок сорта «Грэнни Смит» в течение 21-дневного периода хранения при температуре 15 °C. Покрытие из композиции зеина с низином обеспечивало лучшую сохранность текстуры фруктов.

Если вносить низин напрямую, он часто связывается с жирами, теряет антимикробную активность, распределяется неравномерно или разрушается ферментами, при этом у бактерий может формироваться устойчивость к его действию. Решением выступает его инкапсуляции в твердых матрицах, выполняющих функцию диффузионных барьеров, которые обеспечивают контролируемое высвобождение активного компонента. В частности, включения в состав микрокапсул, липосом или упаковочных пленок. Подобные антимикробные материалы способны сдерживать рост микроорганизмов на поверхностях контактирующих с ними пищевых продуктов за счет контролируемого высвобождения низина, который подавляет или уничтожает патогенные микроорганизмы, а также виды микроорганизмов, вызывающие порчу продукции и потенциально способные к контаминации пищевых изделий [113].

11. Выводы

В современных условиях пищевой промышленности актуальной научной и технологической задачей становится разработка комплексной системы обеспечения безопасности и качества продуктов питания, которая гарантирует сохранение потребительских свойств и микробиологической стабильности без ущерба для органолептических характеристик и пищевой ценности. Реализация данной задачи требует внедрения верифицированных, научно обоснованных технологических решений, отвечающих актуальным требованиям пищевой безопасности и ожиданиям потребителей. Рынок минимально обработанных продуктов и готовых полуфабрикатов быстро расширяется, однако их сохранность остается технологически сложной задачей. Классические методы консервации (высокие температуры, сильные химические антисептики) здесь часто неприменимы, так как они разрушают чувствительные нутриенты и ухудшают органолептические свойства. Поэтому промышленность постепенно переходит к комбинированным «мягким» схемам, где микробная безопасность достигается не за счет агрессивной обработки, а за счет точного подбора натуральных консервантов. Среди органических кислот лимонная работает сразу в двух направлениях: сдвигает pH в кислую область и хелатирует металлы, тормозя окисление. Лизоцим дополняет ее действие, гидролизуя пептидогликан в стенках грамположительных бактерий. Глюконо-дельта-лактон (ГДЛ) полезен там, где нельзя допустить резкого изменения вкуса — он гидролизуется постепенно, давая плавное подкисление. При совместном использовании с лизоцимом или лимонной кислотой ГДЛ усиливает проницаемость мембран, повышая общую эффективность обработки. Надуксусная кислота, в свою очередь, действует как окислитель: быстро инактивирует поверхностную микрофлору, а затем полностью распадается на уксусную кислоту, воду и кислород, не накапливаясь в продукте. Каприловая кислота проявляет себя в липидных системах: ее молекулы встраиваются в мембраны патогенов и дрожжей, вызывая дисбаланс ионов. В паре с лимонной кислотой она работает при меньших дозах, что особенно важно для жировых эмульсий и молочных продуктов. Для борьбы с плесенями и дрожжами оптимальным является натамицин. Благодаря низкой растворимости в воде он остается на поверхности, создавая длительный защитный слой, но не мешает процессам брожения и не меняет вкус. Хитозан решает другую задачу — формирует газо- и влагонепроницаемое покрытие. Сам по себе он лишь замедляет дыхание тканей, но в комбинации с натамицином или кислотами превращается в активную матрицу с контролируемым высвобождением консервантов. Низин же остается препаратом выбора против спорообразующих клостридий и листерий; его действие резко усиливается при совместном применении с мягким нагревом или изменением ионной силы среды. Главной тенденцией сегодня остается отказ от использования монопрепаратов в пользу комбинированных технологий обработки. Так, лимонная кислота разрыхляет клеточные стенки, открывая путь для лизоцима, а ГДЛ поддерживает оптимальный pH для работы каприловой кислоты. Подобные комбинации позволяют сократить дозировки каждого компонента, избежать побочных вкусовых оттенков и одновременно блокировать несколько путей порчи. В результате продукт дольше сохраняет исходную текстуру, цвет и пищевую ценность без введения синтетических стабилизаторов. Переход к таким многоуровневым биоконсервирующим системам не только снижает регуляторные риски, но и задает новый стандарт для производства «чистых» продуктов питания.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК/REFERENCES

1. Nogales-Delgado, S. (2021). Polyphenoloxidase (PPO): Effect, current determination and inhibition treatments in fresh-cut produce. *Applied Sciences,* 11(17), Article 7813. https://doi.org/10.3390/app11177813
2. Gardan, D. A., Bryla, P., Dumitru, I., Gardan, I. P. (2025). Editorial: Industry and individuals: Branding, labelling, and marketing of food products. *Frontiers in Nutrition*, 2, Article 1555875. https://10.3389/fnut.2025.1555875
3. Radziejowska, M. (2023). Health-promoting food labelling — Benefits and drawbacks. *System Safety: Human — Technical Facility — Environment*, 5(1), 249–257. https://doi.org/10.2478/CZOTO-2023-0027
4. Syed, R. U., Moni, S. S., Break, M. K. B., Khojali, W. M. A., Jafar, M., Alshammari, M. D. et al. (2023). Broccoli: A multi-faceted vegetable for health: An in-depth review of its nutritional attributes, antimicrobial abilities, and anti-inflammatory properties. *Antibiotics*, 12(7), Article 1157. https://doi.org/10.3390/antibiotics12071157
5. Santos, M. I., Grácio, M., Silva, M. C., Pedroso, L., Lima, A. (2023). One health perspectives on food safety in minimally processed vegetables and fruits: From farm to fork. *Microorganisms*, 11(12), Article 2990. https://doi.org/10.3390/microorganisms11122990
6. Arumugam, T., Sona C. L., Maheswari M. U. (2021). Fruits and vegetables as Superfoods: Scope and demand. *The Pharma Innovation Journal*, 10(3), 119–129.
7. Посокина, Н. Е., Захарова, А. И. (2023). Современные нетермические способы обработки растительного сырья, применяемые для увеличения его хранимоспособности. *Пищевые системы*, 6(1), 4–10. [Posokina, N. E., Zakharova, A. I. (2023). Modern non-thermal method of processing plant raw materials used to increase its storability. *Food Systems*, 6(1), 4–10. (In Russian)] https://doi.org/10.21323/2618-9771-2023-6-1-4-10
8. Janjarasskul, T., Suppakul, P. (2018). Active and intelligent packaging: The indication of quality and safety. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition,* 58(5), 808–831. https://doi.org/10.1080/10408398.2016.1225278
9. Coban, H. B. (2020). Organic acids as antimicrobial food agents: Applications and microbial productions. *Bioprocess and Biosystems Engineering,* 43(4), 569–591. https://doi.org/10.1007/s00449-019-02256-w
10. Akula, S. T., Nagaraja, A., Ravikanth, M., Kumar, N. G. R., Kalyan, Y., Divya, D. (2021). Antifungal efficacy of lauric acid and caprylic acid — Derivatives of virgin coconut oil against *Candida albicans*. *Biomedical and Biotechnology Research Journal,* 5(2), 229–234. https://doi.org/10.4103/bbrj.bbrj_65_21
11. Pellissery, A. J., Vinayamohan, P. G., Xue, J., Wang, X., Viju, L.S., Joseph, D. et al. (2022). Ecacy of pectin-based caproic acid, caprylic acid, linalool, and cuminaldehyde coatings in reducing Salmonella Heidelberg on chicken eggs. *Frontiers in Sustainable Food Systems,* 6, Article 874219. https://doi.org/10.3389/fsufs.2022.874219
12. López-Velázquez, J. G., Ayón-Reyna, L. E., Vega-García, M. O., López-Angulo, G., López-López, M. E., López-Zazueta, B. A. et al. (2022). Caprylic acid in *Vitex mollis* fruit and its inhibitory activity against a thiabendazole-resistant *Colletotrichum gloeosporioides* strain. *Pest Management Science*, 78(12), 5271–5280. https://doi.org/10.1002/ps.7149
13. Wang, W., Wang, R., Zhang, G., Chen, F., Xu, B. (2020). In vitro antibacterial activities and mechanisms of action of fatty acid monoglycerides against four foodborne bacteria. *Journal of Food Protection,* 83(2), 331–337. https://doi.org/10.4315/0362-028X.JFP-19-259
14. Sorathiya, K. B., Melo, A., Hogg, M. C., Pintado, M. (2025). Organic acids in food preservation: Exploring synergies, molecular insights, and sustainable applications. *Sustainability,* 17(8), Article 3434. https://doi.org/10.3390/su17083434
15. Nair, M. K. M., Vasudevan, P., Hoagland, T., Venkitanarayanan, K. (2004). Inactivation of *Escherichia coli* O157: H7 and *Listeria monocytogenes* in milk by caprylic acid and monocaprylin. *Food Microbiology*, 21(5), 611–616. https://doi.org/10.1016/j.fm.2004.01.003
16. Kim, S. A., Rhee, M. S. (2015). Synergistic antimicrobial activity of caprylic acid in combination with citric acid against both *Escherichia coli* O157: H7 and indigenous microflora in carrot juice. *Food Microbiology*, 49, 166–172. https://doi.org/10.1016/j.fm.2015.02.009
17. Książek, E. (2023). Citric acid: Properties, microbial production, and applications in industries. *Molecules*, 29(1), Article 22. https://doi.org/10.3390/molecules29010022
18. Latif, A., Hassan, N., Ali, H., Niazi, M. B. K., Jahan, Z., Ghuman, I. L. et al. (2024). An overview of key industrial product citric acid production by Aspergillus niger and its application. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, 52, Article kuaf007. https://doi.org/10.1093/jimb/kuaf007
19. Terdbaramee, U., Ratanakhanokchai, K., Kanlayanarat, S. (2023). Effect of citric acid on the control of postharvest browning of lychee fruit under cold storage. *Acta Horticulturae*, 628, 527–532. https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2003.628.66
20. Nongnual, T., Butprom, N., Boonsang, S., Kaewpirom, S. (2024). Citric acid cross-linked carboxymethyl cellulose edible films: A case study on preserving freshness in bananas. *International Journal of Biological Macromolecules,* 267(Part 1), Article 131135. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.131135
21. Tekin, O., Kucuker, E., Aglar, E. (2025). Effects of postharvest citric, oxalic acid and modified atmosphere packaging applications on fruit quality and biochemical properties in persimmon. *BMC Plant Biology,* 25, Article 1353. https://doi.org/10.1186/s12870-025-07368-y
22. Liu, Q., Liu, H., Li, C., Liu, X., Liu, G., Li, Z. (2024). Citric acid treatment inhibits fading of sorghum (*Sorghum bicolor*) by modulating the accumulation of flavonoids. *Food Chemistry,* 1, 460(Part 2), Article 140612. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.140612
23. Sorathiya, K. B., Melo, A., Hogg, M. C., Pintado, M. (2025). Organic acids in food preservation: Exploring synergies, molecular insights, and sustainable applications. *Sustainability*, 17(8), Article 3434. https://doi.org/10.3390/su17083434
24. Lai, W., Wang, L., Pang, Y., Xin, M., Li, M., Shi, L. et al. (2024). Preparation of citric acid cross-linked chitosan quaternary phosphonium/polyvinyl alcohol composite film and its application in strawberry preservation. *Food Chemistry,* 455, Article 139908. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.139908
25. West, T. P. (2023). Citric acid production by *Aspergillus niger* using solid-state fermentation of agricultural processing coproducts. *Applied Biosciences*, 2(1), 1–13. https://doi.org/10.3390/applbiosci2010001
26. Behera, B. C. (2020). Citric acid from *Aspergillus niger*: A comprehensive overview. *Critical Reviews in Microbiology,* 46(6), 727–749. https://doi.org/10.1080/1040841X.2020.1828815
27. Behera, B. C., Mishra, R., Mohapatra, S. (2021). Microbial citric acid: Production, properties, application, and future perspectives. *Food Frontiers*, 2, 62–76. https://doi.org/10.1002/fft2.66
28. Jiang, Y., Pen, L., Li, J. (2004). Use of citric acid for shelf life and quality maintenance of fresh-cut Chinese water chestnut. *Journal of Food Engineering*, 63(3), 325–328. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2003.08.004
29. Liu, K., Liu, J., Li, H., Yuan, C., Zhong, J., Chen, Y. (2016). Influence of postharvest citric acid and chitosan coating treatment on ripening attributes and expression of cell wall related genes in cherimoya (*Annona cherimola* Mill.) fruit. *Scientia Horticulturae,* 198, 1–11. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.11.008

30. Ressutte, J. B., da Silva Saranti, T. F., de Moura, M. R., dos Santos Pozza, M. S., da Silva Scapim, M. R., Stafussa, A. P. et al. (2022). Citric acid incorporated in a chitosan film as an active packaging material to improve the quality and duration of matured cheese shelf life. *Journal of Dairy Research*, 89(2), 201–207. https://doi.org/10.1017/S0022029922000383
31. Umm, K., Saeed, S. A., Muhammad, A., Fazal, A., Noor, F., Fahmida, A. et al. (2025). Synergistic effect of citric acid and ascorbic acid in antimicrobial packaging films for extending the shelf life of fresh produce. *Indus Journal of Bioscience Research*, 3(11), 68–75. https://doi.org/10.70749/ijbr.v3i11.2653
32. Bellaouchi, R., Hasnaoui, I., Idrissi, Y. M., Bentouhami, N., Hasnaoui A., Taibi M. et al. (2024). Improving dietary citric acid production by the wild-type *Aspergillus niger* ASP26 strain isolated from date by-product. *Food Science and Nutrition,* 12(6), 4248–4258. https://doi.org/10.1002/fsn3.4084
33. Guo, C., Yucen, X., de Moraes, J. O., Wang, L. (2026). Assessing the use of acid-based sanitizers for enhancing the microbial safety and quality of collard greens and kale. *Food Microbiology,* 137, Article 105040. https://doi.org/10.1016/j.fm.2026.105040
34. Ribeiro, M. S. S., Freitas-Silva, O., Castro, I. M., Teixeira, A., Marques-da-Silva, S. H., Sales-Moraes, A. C. S. et al. (2020). Efficacy of sodium hypochlorite and peracetic acid against *Aspergillus nomius* in Brazil nuts. *Food Microbiology*, 90, Article 103449. https://doi.org/10.1016/j.fm.2020.103449
35. Александрова, Я. Р., Козак, С. С., Козак, Ю. А. (2023). Влияние жесткости воды на дезинфицирующую активность средств на основе надуксусной кислоты. *Птицеводство,* 72(12), 88–92. [Aleksandrova, Y. E., Kozak, S. S., Kozak, Yu. A. (2023). The effect of water hardness on the activity of the solutions of peroxyacetic acid based disinfectants. *Ptitsevodstvo*, 72(12), 88–92. (In Russian)] https://doi.org/10.33845/0033-3239-2023-72-12-88-92
36. Fernandez, M., Calle, A. (2025). Differences in *Salmonella* serovars response to lactic acid and peracetic acid treatment applied to pork. *Journal of Food Protection,* 88(1), Article 100403. https://doi.org/10.1016/j.jfp.2024.100403
37. Carletto, D., Furtado, F., Zhang, J., Asimakopoulos, A. G., Eggen, M., Verstege, G. C. et al. (2022). Mode of application of peracetic acid-based disinfectants has a minimal influence on the antioxidant defences and mucosal structures of Atlantic salmon (*Salmo salar*) parr. *Frontiers in Physiology*, 13, Article 900593. https://doi.org/10.3389/fphys.2022.900593
38. Cano, C., Meneses, Y., Chaves, B. D. (2021). Application of peroxyacetic acid for decontamination of raw poultry products and comparison to other commonly used chemical antimicrobial interventions: A review. *Journal of Food Protection,* 84(10), 1772–1783. https://doi.org/10.4315/JFP-21-107
39. de Rezende, H. C., de Lima, M., Santos, L. D. (2023). Peracetic acid application as an antimicrobial and its residual (HEDP): A holistic approach on the technological characteristics of chicken meat. *Poultry Science Journal,* 102(10), Article 103003. https://doi.org/10.1016/j.psj.2023.103003
40. de Moraes Motta Machado, M. C., Lepaus, B. M., Bernardes, P. C., de São José, J. F. B. (2022). Ultrasound, acetic acid, and peracetic acid as alternatives sanitizers to chlorine compounds for fresh-cut kale decontamination. *Molecules,* 27(20), Article 7019. https://doi.org/10.3390/molecules27207019
41. Alvaro, J. E., Moreno, S., Dianez, F., Santos, M., Carrasco, G., Urrestarazu, M. (2009). Effects of peracetic acid disinfectant on the postharvest of some fresh vegetables. *Journal of Food Engineering,* 95, 11–15. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2009.05.003
42. Singh, P., Hung, Y.-C., Qi, H. (2018). Efficacy of peracetic acid in inactivating foodborne pathogens on fresh produce surface. *Journal of Food Science*, 83(2), 432–439. https://doi.org/10.1111/1750-3841.14028
43. Nicolau-Lapeña, I., Abadias, M., Bobo, G., Aguiló-Aguayo, I., Lafarga, T., Viñas, I. (2019). Strawberry sanitization by peracetic acid washing and its effect on fruit quality. *Food Microbiology*, 83, 159–166. https://doi.org/10.1016/j.fm.2019.05.004
44. Swing, C. J., Gonzalez, S. V., Hernandez-Sintharakao, M. J., Nair, M. N., Geornaras, I. (2025). Efficacy of peroxyacetic acid and sulfuric acid-surfactant blends for reducing *Listeria monocytogenes* contamination on the surface of whole cantaloupes. *Journal of Food Protection*, 88(11), Article 100634. https://doi.org/10.1016/j.jfp.2025.100634
45. Shen, X., Cong, J., Mugendi, J., Hanrahan, I., Zhu, M. J. (2021). Synergistic effects of lauric arginate and peracetic acid in reducing *Listeria monocytogenes* on fresh apples. *Frontiers in Microbiology,* 12, Article 641034. https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.641034
46. Shin, M., Na, G., Kang, J.-W., Kang, D.-H. (2024). Application of combined treatment of peracetic acid and ultraviolet-C for inactivating pathogens in water and on surface of apples. *International Journal of Food Microbiology,* 411, Article 110519. https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2023.110519
47. Yang, T., Yan, W. (2025). Strategies for enhancing the antibacterial efficacy of lysozyme and the resulting outcome. *International Journal of Biological Macromolecules,* 310(Part 1), Article 143137. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.143137
48. Bergamo, A., Sava, G. (2021). Lysozyme: A natural product with multiple and useful antiviral properties. *Molecules,* 29(3), Article 652. https://doi.org/10.3390/molecules29030652
49. Nawaz, N., Wen, S., Wang, F., Nawaz, S., Raza, J., Iftikhar, M. et al. (2022). Lysozyme and its application as antibacterial agent in food industry. *Molecules,* 27(19), Article 6305. https://doi.org/10.3390/molecules27196305
50. Khorshidian, N., Khanniri, E., Koushki, M. R., Sohrabvandi, S., Yousefi, M. (2022). An overview of antimicrobial activity of lysozyme and its functionality in cheese. *Frontiers in Nutrition,* 9, Article 833618. https://doi.org/10.3389/fnut.2022.833618
51. Barbiroli, A., Bonomi, F., Capretti, G., Iametti, S., Manzoni, M., Piergiovanni, L. et al. (2012). Antimicrobial activity of lysozyme and lactoferrin incorporated in cellulose-based food packaging. *Food Control,* 26(2), 387–392. https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2012.01.046
52. Li, Z., Lin, S., Zhu, M., Liu, X., Huang, X. (2025). Enhanced antibacterial activity of hydrophobic modified lysozyme against gram-negative bacteria without accumulated resistance. *Molecules,* 30(2), Article 232. https://doi.org/10.3390/molecules30020232
53. Amara, C. B, Eghbal, N., Oulahal, N., Degraeve, P., Gharsallaoui, A. (2016). Properties of lysozyme/sodium alginate complexes for the development of antimicrobial films. *Food Research International,* 89(Part 1), 272–280. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2016.08.015
54. Yang, T., Yan, W. (2025). Strategies for enhancing the antibacterial efficacy of lysozyme and the resulting outcome. *International Journal of Biological Macromolecules*, 310(Part 1), Article 143137. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.143137
55. Li, Z., Yang, L., Wang, B., Li, Y., Ji, X., Li, N. et al. (2025). A multifunctional nanozyme hydrogel film with antibacterial and antioxidant activity for fruit packaging and freshness preservation. *Food Research International,* 218, Article 116943, https://doi.org/10.1016/j.foodres.2025.116943
56. Юрна, Д. А., Фролов, Д. И. (2023). Технологии безопасной консервации продуктов животного происхождения. *Инновационная техника и технология,* 10(2), 44–51. [Yurna, D. A., Frolov, D. I. (2023). Technologies for safe preservation of animal products. *Innovative Machinery and Technology*, 10(2), 44–51 (In Russian)]
57. Abdou, A. M., Awad, D. A. B. (2025). Lysozyme peptides as a novel nutrapreservative to control some food poisoning and food spoilage microorganisms. *Probiotics and Antimicrobial Proteins*, 17, 1663–1673. https://doi.org/10.1007/s12602-024-10226-2
58. Li, H., Zhang, Y., Liu, T., Zhang, L., Li, M., Li, H. et al. (2023). Transglutaminase (TG), glucono-δ-lactone (GDL), and citric acid (CA) induced whey protein isolation — milk fat emulsion gel embedding lutein and its application in processed cheese. *Journal of Dairy Science,* 106(1), 6635–6645. https://doi.org/10.3168/jds.2022-23097
59. Han, Q., Sheng, G., Bai, H., Xu, X., Wei, X., Zhou, Q. (2025). The influence of glucono-δ-lactone on pea-based 3D printing meat analogues: Rheological properties, printing properties and textural properties. *European Food Research and Technology,* 251, 3605–3618. https://doi.org/10.1007/s00217-025-04845-4
60. Shamsudin, N. A., Low, Y. -K., Cheng, L.-H. (2022). Effects of glucono delta lactone dipping and in-pack pasteurization on rice noodles properties. *Current Research in Food Science*, 5, 886–891. https://doi.org/10.1016/j.crfs.2022.05.007
61. Aliabbasi, N., Emam-Djomeh, Z., Askari, G., Salami, M. (2023). Design of glucono-δ-lactone-induced pinto bean protein isolate/κ-carrageenan mixed gels with various microstructures: Fabrication, characterization, and release behavior. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 103(3), 1484–1498. https://doi.org/10.1002/jsfa.12246
62. Herz, E. M., Schfer, S., Terjung, N., Gibis, M., Weiss, J. (2021). Influence of transglutaminase on glucono-δ-lactone-induced soy protein gels. *ACS Food Science and Technology,* 1(8), 1412–1417. https://doi.org/10.1021/acsfoodscitech.1c00102
63. Shukri, A. M., Cheng L.-H. (2023). The properties of different starches under the influence of glucono-delta-lactone at different concentrations. *Foods*, 12(9), Article 1770. https://doi.org/10.3390/foods12091770
64. Xu, Y., He, C., Zhou, Z. (2024). Modulating the texture of heat-set gels of phosphorylated walnut protein isolates through Glucono-δ-lactone acidification. *Food Chemistry,* 437(Part 1), Article 137734. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.137734
65. Ojukwu, M., Tan, H. L., Murad, M., Nafchi, A. M., Easa, A. M. (2023). Improvement of cooking and textural properties of rice flour-soy protein isolate noodles stabilised with microbial transglutaminase and glucono-δ-lactone and dried using superheated steam. *Food Science and Technology International,* 29(8), 799–808. https://doi.org/10.1177/10820132221121169
66. Zhang, S., Yang, L., Nie, Y., Li, H., Zhu, D., Cao, X. et al. (2025). Effects of thermal treatment and Glucono-δ-lactone on the quality of alkaline dough and steamed buns. *Food Chemistry,* 471, Article 142818. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2025.142818
67. Gokul, S. S., Beena, R. L., Rajakumar, S. N., Divya, M. P., Suraj, S., Divya, K. B. et al. (2025). Shelf-life extension of paneer using a combination of permitted preservatives and Glucono Delta Lactone as coagulant (GDL). *International Journal of Agriculture and Food Science,* 7(9), 107–111. https://doi.org/10.33545/2664844X.2025.v7.i9b.736
68. Li, Q., Hua, Y., Li, X., Kong, X., Zhang, C., Chen, Y. (2022). Effects of heat treatments on the properties of soymilks and glucono-δ-Lactone induced tofu gels. *Food Research International,* 161, Article 111912. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.111912
69. Al-Hatim, R. R., Al-Younis, Z. K., Issa, N. K., Al-Shawi, S. G. (2021). Application of glucono-delta-lactone acid (gdl) infoods system: A review. *Natural Volatiles and Essential Oils*, 8(4), 11459–11474.
70. Майоров, А. А., Мироненко, И. М., Яшкин, А. И. (2012). Исследование возможности использования глюконо-дельта-лактона в технологии мягкого сыра из восстановленного цельного молока. *Техника и технология пищевых производств,* 4(27), 27–31. [Mayorov A. A., Mironenko, I. M., Yashkin A. I. (2012). Using glucono-delta-lactone for the production of soft cheese from restored whole milk. *Food Processing: Techniques and Technology,* 4(27), 27–31. (In Russian)]
71. Rahma, A. S. (2021). Production technology for adding GDL (Glucono Delta Lactone) to soy-based foods. *International Journal of Quantitative Research and Modeling,* 2(2), 75–82. https://doi.org/10.46336/ijqrm.v2i2.150
72. Zeng, X., Danquah, M. K., Jing, K, Woo, M. W., Chen, X. D., Xie, Y. et al. (2013). Solubility properties and diffusional extraction behavior of natamycin from *Streptomyces gilvosporeus* biomass. *Biotechnology Progress,* 29, 109–115. https://doi.org/10.1002/btpr.1659
73. Luo, J. M., Jin, Z. H., Cen, P.-L., Wang, M. (2008). Measurement and correlation of the solubilities of natamycin in different solvents. *Gaoxiao Huaxue Gongcheng Xuebao (Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities),* 22, 733–738. (In Chinese)
74. Wang, D., Shen, W., Yuan, J., Sun. J., Wang, M. (2021). Advances in the biosynthesis of natamycin and its regulatory mechanisms. *Sheng Wu Gong Cheng Xue Bao,* 37(4), 1107–1119. https://doi.org/10.13345/j.cjb.200394

75. Chen, D., Förster, H., Adaskaveg, J. E. (2021). Baseline sensitivities of major citrus, pome, and stone fruits postharvest pathogens to natamycin and estimation of the resistance potential in *Penicillium digitatum*. *Plant Disease,* 105(8), 2114–2121. https://doi.org/10.1094/PDIS-07-20-1421-RE
76. Stark, J. (2003). Natamycin: An effective fungicide for food and beverages. Chapter in a book: Natural Antimicrobials for the Minimal Processing of Foods. Woodhead Publishing, 2003. https://doi.org/10.1533/9781855737037.82
77. Delves-Broughton, J. (2014). Preservatives. Permitted preservatives — Natamycin. Chapter in a book: Reference Module in Food Science. Elsevier, 2014. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384730-0.00269-X
78. Haro-Reyes, T., Díaz-Peralta, L., Galván-Hernández, A., Rodríguez-López, A., Rodríguez-Fragoso, L., Ortega-Blake, I. (2022). Polyene antibiotics physical chemistry and their effect on lipid membranes; Impacting biological processes and medical applications. *Membranes*, 12(7), Article 681. https://doi.org/10.3390/membranes12070681
79. Meena, M., Prajapati, P., Ravichandran, C., Sehrawat, R. (2021). Natamycin: A natural preservative for food applications — A review. *Food Science and Biotechnology*, 30(12), 1481–1496. https://doi.org/10.1007/s10068-021-00981-1
80. Hondrodimou, O. Kourkoutas, Y. Panagou, E. Z. (2011). Efficacy of natamycin to control fungal growth in natural black olive fermentation. *Food Microbiology*, 28(3), 621–627. https://doi.org/10.1016/j.fm.2010.11.015
81. Gourama, H., Bullerman, L. B. (1988). Effects of potassium sorbate and natamycin on growth and penicillic acid production by *Aspergillus ochraceus*. *Journal of Food Protection*, 51(2),139–145. https://doi.org/10.4315/0362-028X-51.2.139
82. Wen, M., Lin, X., Yu, Y., Wu, J., Xu, Y., Xiao, G. (2019). Natamycin treatment reduces the quality changes of postharvest mulberry fruit during storage. *Journal of Food Biochemistry*, 43, Article e12934. https://doi.org/10.1111/jfbc.12934
83. He, C., Zhang, Z., Li, B., Xu, Y., Tian, Sh. (2019) Effect of natamycin on *Botrytis cinerea* and *Penicillium expansum* — Postharvest pathogens of grape berries and jujube fruit. *Postharvest Biology and Technology*, 151, 134–141. https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2019.02.009
84. Aparicio, J. F., Barreales, E. G., Payero, T. D., Vicente, C. M., de Pedro, A., Santos-Aberturas, J. (2016). Biotechnological production and application of the antibiotic pimaricin: Biosynthesis and its regulation. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 100(1), 61–78. https://doi.org/10.1007/s00253-015-7077-0
85. Chen, D., Förster, H., Adaskaveg, J. E. (2021) Natamycin, a biofungicide for managing major postharvest fruit decays of citrus. *Plant Disease*, 105(5), 1408–1414. https://doi.org/10.1094/PDIS-08-20-1650-RE
86. Liu, H., Yang, H., Zhao, H., Lyu, L., Wu, W., Li, W. (2022). The mechanism of protective effect on postharvest blackberry fruit treated with ferulic acid and natamycin jointly using transcriptomics and proteomics methods. *European Food Research and Technology*, 248(10), 2637–2649. https://doi.org/10.1007/s00217-022-04076-x
87. Karaman, K., Sagdic, O., Yilmaz, M. T. (2020). *Potential of natamycin to control growth of Zygosaccharomyces spp. in apple juice during storage*. *International Journal of Food Microbiology,* 332(5), Article 108771. https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2020.108771
88. Casco, M. A., Jagus, R. J., Agüero, M. V., Fernandez, M. V. (2022). Ultrasound and its combination with natural antimicrobials: Effects on shelf life and quality stability of a fruit and vegetable smoothie. *Food and Bioprocess Technology*, 15(5), 203–218. https://doi.org/10.1007/s11947-021-02745-5
89. Zeng, X., Miao, W., Zeng, H., Zhao, K., Zhou, Y., Zhang, J. et al. (2019). Production of natamycin by *Streptomyces gilvosporeus* Z28 through solid-state fermentation using agro-industrial residues. *Bioresource Technology,* 273, 377–385. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.11.009
90. Aparna, M., Geetha Lekshmi, P. R. (2024). Chitosan based edible coatings: Enhancing shelf life and quality in fruits and vegetables. *Journal of Advances in Biology and Biotechnology,* 27(11), 178–191. https://doi.org/10.9734/jabb/2024/v27i111603
91. Saberi, R. S., Vatankhah, M., Hassanisaadi, M., Kennedy, J. F. (2023). Chitosan-based nanocomposites as coatings and packaging materials for the postharvest improvement of agricultural product: A review. *Carbohydrate Polymers,* 309, Article 120666. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2023.120666
92. Бурак, Л. Ч. (2024). Использование современных технологий обработки для увеличения срока хранения фруктов и овощей. Обзор предметного поля. *Ползуновский вестник*, 1, 99–119. [Burak, L. Ch. (2024). Use of modern processing technologies to increase the storage life of fruit and vegetables. Review of the subject field. *Polzunovskiy VESTNIK,* 1, 99–119 (In Russian)]. https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2024.01.013
93. Sakif, T. I., Dobriansky, A., Russell, K., Islam, T. (2016). Does chitosan extend the shelf life of fruits? *Advanced in Bioscience and Biotechnology*, 7(8), 337–342. https://doi.org/10.4236/abb.2016.78032
94. Romanazzi, G., Feliziani, E., Bautista-Banos, S. B., Sivakumar, D. (2017). Shel life extension of fresh fruit and vegetables by chitosan treatment. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition,* 57(3), 579–601. https://doi.org/10.1080/10408398.2014.900474
95. Rahman, M. A., Islam, M. A., Sultan, M. T., Kamal, A. H. M., Khan, R. A., Razzak, M. et al. (2019). Assessment of chitosan as preservative on shelf life and major nutrient contents on fruits and vegetables. *American Journal of Agricultural Sciences*, 6(1), 1–10. https://doi.org/10.2478/ausal-2019-0002
96. Kumar, R., Sharma, P., Dipsikha, Sharma, T., Ranaut, S. (2022). Enhancement of shelf life of guava fruits by application of chitosan based nanoemulsion. *Asian Journal of Dairy and Food Research*, 25(2), 2056–2062. https://doi.org/10.18805/ajdfr.DR-2052
97. Zheng, H., Deng, W., Yu, L., Shi, Y., Deng, Y., Wang, D. et al. (2024). Chitosan coatings with different degrees of deacetylation regulate the postharvest quality of sweet cherry through internal metabolism. *International Journal of Biological Macromolecules,* 254(1), Article 127419. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.127419
98. Sun, J., Wang, T., Liu, L., Li, Q., Liu, H., Wang, X. et al. (2025). Preparation and application of edible chitosan coating incorporating natamycin. *Polymers*, 17(8), Article 1062. https://doi.org/10.3390/polym17081062
99. Zhou, Y., Hu, L., Chen, Y., Liao, L., Li, R., Wang, H. et al. (2022). The combined effect of ascorbic acid and chitosan coating on postharvest quality and cell wall metabolism of papaya fruits. *LWT,* 171, Article 114134. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.114134
100. Zhou, Y., Liu, X., Liang, X., Li, H., Lai, J., Liao, Y. et al. (2024). Biochemical and metabolomics analyses reveal the mechanisms underlying ascorbic acid and chitosan coating mediated energy homeostasis in postharvest papaya fruit. *Food Chemistry,* 439, Article 138168. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.138168
101. Popescu, P.-A., Palade, L. M., Nicolae, I.-C., Popa, E. E., Miteluț, A. C., Drăghici, M. C. et al. (2022). Chitosan-based edible coatings containing essential oils to preserve the shelf life and postharvest quality parameters of organic strawberries and apples during cold storage. *Foods*, 11(21), Article 3317. https://doi.org/10.3390/foods11213317
102. Saleem, M. S., Anjum, M. A., Naz, S., Ali, S., Hussain, S., Azam, M. et al. (2021). Incorporation of ascorbic acid in chitosan-based edible coating improves postharvest quality and storability of strawberry fruits. *International Journal of Biological Macromolecules,* 189, 160–169. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.08.051
103. Chien, P.-J., Sheu, F., Yang, F.-H. (2007). Effects of edible chitosan coating on quality and shelf life of sliced mango fruit. *Journal of Food Engineering,* 78(1), 225–229, https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.09.022
104. Jurić, S., Bureš, M. S., Vlahoviček-Kahlina, K., Stracenski, K. S., Fruk, G., Jalšenjak, N., et al. (2023). Chitosan-based layer-by-layer edible coatings application for the preservation of mandarin fruit bioactive compounds and organic acids. *Food Chemistry: X,* 17, Article 100575. https://doi.org/10.1016/j.fochx.2023.100575
105. Niu, C., Liu, L., Farouk, A., Chen, C., Ban, Z. (2023). Coating of layer-by-layer assembly based on chitosan and CMC: Emerging alternative for quality maintenance of citrus fruit. *Horticulturae,* 9(6), Article 715. https://doi.org/10.3390/horticulturae9060715
106. Deb Majumder, S., Ganguly, S. S. (2020). Effect of a chitosan edible-coating enriched with *Citrus limon* peel extracts and *Ocimum tenuiflorum* leaf extracts on the shelf-life of bananas. *Biosurface and Biotribology,* 6, 124–128. https://doi.org/10.1049/bsbt.2020.0002
107. Field, D., de Ullivarri, M. F., Ross, R. P., Hill, C., (2023). After a century of nisin research — where are we now? *FEMS Microbiology Reviews*, 47(3), Article fuad023. https://doi.org/10.1093/femsre/fuad023
108. Todorov, S. D., Popov, I., Weeks, R., Chikindas, M. L. (2022). Use of bacteriocins and bacteriocinogenic beneficial organisms in food products: Benefits, challenges, concerns. *Foods*, 11(19), Article 3145. https://doi.org/10.3390/foods11193145
109. Costello, K. M., Cindy, S., Gutierrez-Merino, J., Bussemaker, M., Van Impe, J. F., Velliou, E. G. (2021). The impact of food model system structure on the inactivation of *Listeria innocua* by cold atmospheric plasma and nisin combined treatments. *International Journal of Food Microbiology,* 337, Article 108948, https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2020.108948
110. Gharsallaoui, A., Oulahal, N., Joly, C., Degraeve, P. (2016). Nisin as a food preservative: Part 1: Physicochemical properties, antimicrobial activity, and main uses. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition.* 56(8), 1262–1274. https://doi.org/10.1080/10408398.2013.763765
111. Hernandez-Mendoza, E., Peña-Ramos, E. A., Juneja, V. K., Valenzuela-Melendres, M., Scheuren-Acevedo, M. S., Osoria, M. (2023). Optimizing the effects of nisin and NaCl to thermal inactivate *Listeria monocytogenes* in ground beef with chipotle sauce during sous-vide processing. *Journal of Food Protection,* 86(5), Article 100086. https://doi.org/10.1016/j.jfp.2023.100086
112. Wang, X., Kang, W., Li, J., Deng, Z., Gao, J. (2025). Nisin: Harnessing nature's preservative for the future of food safety and beyond. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 65(34), 9045–9070. https://doi.org/10.1016/j.jfp.2023.100086
113. Gharsallaoui, A., Joly, C., Oulahal, N., Degraeve, P. (2016). Nisin as a food preservative: Part 2: Antimicrobial polymer materials containing nisin. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 56(8), 1275–1289. https://doi.org/10.1080/10408398.2013.763766

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ	AUTHOR INFORMATION
Принадлежность к организации	**Affiliation**
Посокина Наталья Евгеньевна — кандидат технических наук, заведующая лабораторией, лаборатория технологии консервирования, Всероссийский научно-исследовательский институт технологии консервирования 142703, Московская обл., Видное, Школьная ул., 78 E-mail: n.posokina@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7857-6785 * автор для контактов	**Natalia E. Posokina**, Candidate of Technical Sciences, Head of the Laboratory of Food Canning Technology, All-Russian Scientific Research Institute of Preservation Technology 78, Shkol'naya Str., Vidnoe, 142703, Moscow region, Russia E-mail: n.posokina@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7857-6785 * corresponding author
Захарова Анна Ивановна — научный сотрудник, лаборатория технологии консервирования, Всероссийский научно-исследовательский институт технологии консервирования 142703, Московская обл., Видное, Школьная ул., 78 E-mail: a.zaharova@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2336-1816	**Anna I. Zakharova**, Researcher, Laboratory of Food Canning Technology, All-Russian Scientific Research Institute of Preservation Technology 78, Shkol'naya Str., Vidnoe, 142703, Moscow region, Russia E-mail: a.zaharova@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2336-1816
Критерии авторства	**Contribution**
Авторы в равных долях имеют отношение к написанию рукописи и одинаково несут ответственность за плагиат.	Authors equally relevant to the writing of the manuscript, and equally responsible for plagiarism.
Конфликт интересов	**Conflict of interest**
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.	The authors declare that there is no conflict of interest.

DOI: https://doi.org/10.21323/2618-9771-2026-9-2-270-281

Received 10.09.2025
Accepted in revised 03.06.2026
Accepted for publication 08.06.2026
© Pratama B. P., Khairullah A. R., Yulianti W., Mustofa I., Ahmad R. Z., Leliana L., Sukmanadi M., Afifah N. R., Utari, F., Akintunde A. O., Agrippina F. D., Hidayat M. R. F., Wardhani B. W. K., Moses I. B., Kurniasih D. A. A., Ansori A. N. M., 2026

Available online at https://www.fsjour.com/jour
Review article
Open access

ZIRCONIUM DIOXIDE (ZRO_2) FOR ACTIVE FOOD PACKAGING: PHYSICOCHEMICAL TRAITS, MULTIFUNCTIONAL MECHANISMS, COMPARATIVE ADVANTAGES, SAFETY, AND PROSPECTS

Bima P. Pratama[1], Aswin R. Khairullah[2], Wita Yulianti[3], Imam Mustofa[4], Riza Z. Ahmad[2], Lulum Leliana[5], Mohammad Sukmanadi[6*], Nabila R. 'Afifah[7], Fadhila Utari[8], Adeyinka O. Akintunde[9], Fidela D. Agrippina[10], Muhammad R. F. Hidayat[11], Bantari W. K. Wardhani[8], Ikechukwu B. Moses[12], Dea A. A. Kurniasih[13], Arif N. M. Ansori[14,15,16]

[1] Research Center for Process Technology, National Research and Innovation Agency (BRIN), South Tangerang City, Banten, Indonesia
[2] Research Center for Veterinary Science, National Research and Innovation Agency (BRIN), Jl. Raya Bogor Km. 46 Cibinong, Bogor, West Java, Indonesia
[3] Research Center for Biota Systems, National Research and Innovation Agency (BRIN), Jl. Raya Bogor Km. 46 Cibinong, Bogor, West Java, Indonesia
[4] Division of Veterinary Reproduction, Faculty of Veterinary Medicine, Universitas Airlangga, Kampus C Mulyorejo, Jl. Dr. Ir. H. Soekarno, Surabaya, East Java, Indonesia
[5] Department of Food and Agricultural Product Technology, Faculty of Agricultural Technology, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, Indonesia
[6] Division of Basic Veterinary Medicine, Faculty of Veterinary Medicine, Universitas Airlangga, Kampus C Mulyorejo, Jl. Dr. Ir. H. Soekarno, Surabaya, East Java, Indonesia
[7] Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, University of Lampung, Bandar Lampung City, Lampung, Indonesia
[8] Research Center for Pharmaceutical Ingredients and Traditional Medicine, National Research and Innovation Agency (BRIN), Jl. Raya Bogor Km. 46 Cibinong, Bogor, West Java, Indonesia
[9] Department of Agriculture and Industrial Technology, Babcock University, Ilishan Remo, Ogun, Nigeria
[10] Center for Standardization and Industrial Services (BSPJI) Bandar Lampung, Ministry of Industry, Bandar Lampung City, Lampung, Indonesia
[11] Master Program of Industrial Engineering, Faculty of Industrial Technology and Systems Engineering, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Jl. Teknik Kimia, Keputih, Surabaya, East Java, Indonesia
[12] Department of Applied Microbiology, Faculty of Science, Ebonyi State University, Abakaliki, Nigeria
[13] Research Center for Public Health and Nutrition, National Research and Innovation Agency (BRIN), Jl. Raya Bogor Km. 46 Cibinong, Bogor, West Java, Indonesia
[14] Postgraduate School, Universitas Airlangga, Kampus B Dharmawangsa, East Java, Indonesia
[15] Uttaranchal Institute of Pharmaceutical Sciences, Uttaranchal University, Uttarakhand, India
[16] Medical Biotechnology Research Group, Virtual Research Center for Bioinformatics and Biotechnology, East Java, Indonesia

KEYWORDS:
ZrO_2, active packaging, nanomaterials, human health, food safety

ABSTRACT

Food spoilage driven by microbial contamination and oxidative degradation remains a central challenge in global supply chains, contributing significantly to the 1.3 billion tons of food lost annually. Conventional packaging, which acts merely as a passive barrier, is often insufficient to prevent deterioration and meet consumer demand for fresh, safe, and minimally processed products. Active packaging based on nanomaterials offers a promising solution, with zirconium dioxide (ZrO_2) emerging as a candidate of growing interest. ZrO_2 combines high mechanical strength, chemical inertness, and thermal stability with bioactive functions that are advantageous for food preservation. When incorporated into polymer matrices, ZrO_2 exhibits antimicrobial activity through the generation of reactive oxygen species and membrane disruption, antioxidant capacity by limiting oxygen diffusion and scavenging free radicals, and barrier improvements by reducing gas permeability. These mechanisms collectively delay microbial growth, lipid oxidation, and undesirable changes in color, flavor, and texture. Experimental studies confirm that ZrO_2-containing films and coatings can extend the shelf-life of perishable foods, including meat, dairy, oils, and fresh produce, while maintaining optical clarity and material durability. Importantly, ZrO_2 generally shows low migration under standard food storage conditions, though nanoscale applications necessitate comprehensive toxicological evaluation and regulatory oversight. In addition to its functional properties, ZrO_2 supports sustainability goals when integrated with biodegradable polymers such as PLA, PVA, chitosan, or cellulose. Overall, ZrO_2 offers a balanced combination of efficacy, stability, and safety, positioning it as a promising component in the next generation of clean-label, environmentally responsible active food packaging systems.

FUNDING: This work was supported by the National Research and Innovation Agency (BRIN) and the Indonesia Endowment Fund for Education (LPDP) through the RIIM Program — Competitive Wave 7 (Decree No. 61/II.7/HK/2024). The funding body had no role in the design of the study, the collection, analysis, or interpretation of data, or in writing the manuscript.

ACKNOWLEDGEMENTS: The authors would like to express their sincere gratitude to the National Research and Innovation Agency (BRIN) and the Indonesia Endowment Fund for Education (LPDP) for financial support through the Research and Innovation for Advanced Indonesia (RIIM) Program — Competitive Wave 7, as stipulated in the Decree of the Deputy for Research and Innovation Facilitation of BRIN No. 61/II.7/HK/2024. The authors also acknowledge material and immaterial support from the Research Organization for Agriculture and Food (ORPP BRIN) and the valuable assistance of the Research Center for Mineral Technology, BRIN, in the preparation and completion of this manuscript. Collaborative contributions from Institut Teknologi Sumatera (ITERA) are gratefully appreciated.

FOR CITATION: **Pratama, B. P., Khairullah, A. R., Yulianti, W., Mustofa, I., Ahmad, R. Z., Leliana, L. et al.** (2026). Zirconium dioxide (ZrO_2) for active food packaging: Physicochemical traits, multifunctional mechanisms, comparative advantages, safety, and prospects. *Food Systems,* 9(2), 270–281. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2026-9-2-270-281

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: **Пратама, Б. П., Хайрулла, А. Р., Юлианти, В., Мустофа, И., Ахмад, Р. З., Лелиана, Л. И. др.** (2026). Диоксид циркония (ZrO_2) для активной упаковки пищевых продуктов: физико-химические свойства, многофункциональные механизмы, сравнительные преимущества, безопасность и перспективы. *Пищевые системы*, 9(2), 270–281. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2026-9-2-270-281

Поступила 10.09.2025
Поступила после рецензирования 03.06.2026
Принята в печать 08.06.2026
© Пратама Б. П., Хайрулла А. Р., Юлианти В., Мустофа И., Ахмад Р. З., Лелиана Л., Сукманади М., Афифа Н. Р., Утари Ф., Акинтунде А. О., Агриппина Ф. Д., Хидаят М. Р.Ф., Вардхани Б. В.К., Мозес И. Б., Курниасих Д. А.А., Ансори А. Н.М., 2026

https://www.fsjour.com/jour
Обзорная статья
Открытый доступ

ДИОКСИД ЦИРКОНИЯ (ZRO_2) ДЛЯ АКТИВНОЙ УПАКОВКИ ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ: ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА, МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ МЕХАНИЗМЫ, СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ПРЕИМУЩЕСТВА, БЕЗОПАСНОСТЬ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Бима П. Пратама[1], Асвин Р. Хайрулла[2], Вита Юлианти[3], Имам Мустофа[4], Риза З. Ахмад[2], Лулум Лелиана[5], Мохаммад Сукманади[6*], Набила Р. Афифа[7], Фадхила Утари[8], Адейинка О. Акинтунде[9], Фидела Д. Агриппина[10], Мухаммад Р. Ф. Хидаят[11], Бантари В. К. Вардхани[8], Икечукву Б. Мозес[12], Деа А. А. Курниасих[13], Ариф Н. М. Ансори[14,15,16]

[1] Исследовательский центр технологических процессов, Национальное агентство исследований и инноваций (BRIN), Южный Тангеранг, Бантен, Индонезия
[2] Научно-исследовательский центр ветеринарных наук, Национальное агентство исследований и инноваций (BRIN), Джалан. Рая Богор Км. 46 Cibinong, Богор, Западная Ява, Индонезия
[3] Исследовательский центр биотных систем, Национальное агентство исследований и инноваций (BRIN), Джалан, Рая Богор Км. 46 Чибинонг,, Богор, Западная Ява, Индонезия
[4] Отдел ветеринарной репродукции, факультет ветеринарной медицины, Университет Аирлангга, Кампус С. Мульорехо, Джалан Доктор Ир. Х. Сукарно, Сурабая, Восточная Ява, Индонезия
[5] Кафедра технологии пищевых продуктов и сельскохозяйственной продукции, факультет сельскохозяйственных технологий, Университет Гаджа Мада, Джокьякарта, Индонезия
[6] Отделение фундаментальной ветеринарной медицины, факультет ветеринарной медицины, Университет Аирлангга, Кампус С. Мульорехо, Джалан Доктор Ир. Х. Сукарно, Сурабая, Восточная Ява, Индонезия
[7] Кафедра химической инженерии, инженерный факультет, Университет Лампунг, Бандар-Лампунг, Лампунг, Индонезия
[8] Исследовательский центр фармацевтических ингредиентов и традиционной медицины, Национальное агентство исследований и инноваций (BRIN), Джалан Рая Богор Км. 46 Cibinong, Богор, Западная Ява, Индонезия
[9] Кафедра сельского хозяйства и промышленных технологий, Университет Бэбкока, Илишан Ремо, Огун, Нигерия
[10] Центр стандартизации и промышленных услуг (BSPJI) Бандар Лампунг, Министерство промышленности, Бандар Лампунг, Лампунг, Индонезия
[11] Магистерская программа промышленной инженерии, факультет промышленных технологий и системотехники, Технологический институт Сепулух, Ноябрь, Джалан Текник Кимия, Кепутих, Сурабая, Восточная Ява, Индонезия
[12] Кафедра прикладной микробиологии, факультет естественных наук, Государственный университет Эбони, Абакалики, Нигерия
[13] Исследовательский центр общественного здравоохранения и питания, Национальное агентство исследований и инноваций (BRIN), Джалан Рая Богор Км. 46 Чибинонг, Богор, Западная Ява, Индонезия
[14] Аспирантура, Университет Айрлангга, кампус Б Дхармавангса, Восточная Ява, Индонезия
[15] Институт фармацевтических наук Уттаранчала, Университет Уттаранчала, Уттаранчал, Индия
[16] Исследовательская группа медицинской биотехнологии, Виртуальный исследовательский центр биоинформатики и биотехнологии, Восточная Ява, Индонезия

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *ZrO_2, активная упаковка, наноматериалы, здоровье человека, продовольственная безопасность*

АННОТАЦИЯ

Порча пищевых продуктов, вызванная микробным загрязнением и окислительным разложением, остаётся одной из основных проблем в глобальных цепочках продовольственных поставок, внося значительный вклад в ежегодные потери продовольствия в размере 1,3 млрд тонн. Традиционная упаковка, действующая лишь как пассивный барьер, часто недостаточна эффективна для предотвращения порчи, и удовлетворения потребительского спроса на свежие, безопасные и минимально обработанные пищевые продукты. Активная упаковка на основе наноматериалов предлагает многообещающее решение, причём диоксид циркония (ZrO_2) становится всё более привлекательным вариантом. ZrO_2 сочетает в себе высокую механическую прочность, химическую инертность и термическую стабильность наряду с биоактивными функциями, благоприятными для сохранения пищевых продуктов. При включении в полимерные матрицы ZrO_2 проявляет антимикробную активность за счёт образования активных форм кислорода и разрушения мембран, антиоксидантную активность за счёт ограничения диффузии кислорода и захвата свободных радикалов, а также улучшает барьерные свойства упаковки за счёт снижения газопроницаемости. Эти механизмы в совокупности замедляют рост микроорганизмов, окисление липидов и нежелательные изменения цвета, вкуса и текстуры. Экспериментальные исследования подтверждают, что пленки и покрытия, содержащие ZrO_2, способны продлить срок хранения скоропортящихся продуктов, включая мясо, молочные продукты, масла, и свежие овощи и фрукты, сохраняя при этом оптическую прозрачность и прочность материала. Важно отметить, что ZrO_2, как правило, демонстрирует низкую степень миграции при стандартных условиях хранения пищевых продуктов, хотя применение наноматериалов требует комплексной токсикологической оценки и нормативного контроля. Помимо своих функциональных свойств, ZrO_2 способствует достижению целей экологичности и неистощающего производства в сочетании с биоразлагаемыми полимерами, такими как полилактид (PLA), поливиниловый спирт (PVA), хитозан или целлюлоза. В целом, ZrO_2 обеспечивает сбалансированное сочетание эффективности, стабильности и безопасности, что делает его перспективным компонентом нового поколения экологически безопасных систем активной упаковки для пищевых продуктов с «чистой этикеткой».

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Данная работа была проведена при поддержке Национального агентства исследований и инноваций (BRIN) и Индонезийским фондом целевого финансирования образования (LPDP) в рамках программы исследований и инноваций для передовой Индонезии (RIIM) — Конкурсная волна 7 (Указ № 61/II.7/HK/2024). Финансирующая организация не принимала участия в разработке исследования, сборе, анализе и интерпретации данных, а также в написании рукописи.

БЛАГОДАРНОСТИ: Авторы выражают искреннюю благодарность Национальному агентству исследований и инноваций (BRIN) и Индонезийскому фонду развития образования (LPDP) за финансовую поддержку в рамках Программы исследований и инноваций для передовой Индонезии (RIIM) — Конкурсная волна 7, предусмотренной Постановлением заместителя по научным исследованиям и содействию

инновациям BRIN № 61/II.7/HK/2024. Авторы также выражают благодарность Научно-исследовательской организации сельского хозяйства и продовольствия (ORPP BRIN) за материальную и нематериальную поддержку и Научно-исследовательскому центру по технологиям минералов, BRIN, за ценную помощь в подготовке и написании данной рукописи. С благодарностью приветствуются совместные работы с Институтом технологий Суматры (Institut Teknologi Sumatera (ITERA).

1. Introduction

Food packaging plays a crucial role in preserving food quality all the way through the supply chain [1]. Its primary purpose is to safeguard against environmental changes, microbial contamination, and mechanical damage [2]. However, conventional packaging is passive, only functioning as a barrier without providing active protection during storage [3].

As consumer awareness of food safety increases, demand for fresh products with long shelf life continues to grow [4]. According to FAO statistics, around 1.3 billion tonnes of food are lost annually, primarily as a result of spoiling and damage that occurred during distribution and storage [5]. This circumstance promotes the creation of active packaging as a way to lower losses and extend shelf life.

Food spoilage is generally triggered by oxidation and microbial growth. Microorganisms that cause pathogenicity and spoiling lower quality and raise health concerns, whereas lipid and protein oxidation can alter color, aroma, and nutritional value [6]. Although traditional methods like refrigeration or preservatives work well, they don't always satisfy customers' needs for clean-label food goods [7].

Over the past ten years, nanotechnology has opened up the new possibilities by using nanoparticles smaller than 100 nm, which feature large surface area and special reactive characteristics [8]. Zirconium dioxide (ZrO_2) or Zirconia has drawn interest as a nanoparticle because of its potent antimicrobial properties [9]. For instance, a study by Pandian et al. [10] demonstrated that 90% of the development of *Streptococcus mutans* and *Enterococcus faecalis* could be eliminated by exposure to ZrO_2 at a concentration of 22.8 μg/mL ZrO_2 NPs. Previous studies have reported that ZrO_2 nanoparticles exhibit concentration-dependent antimicrobial activity. Synthesized ZrO_2 nanoparticles demonstrated inhibitory effects against several bacterial species, including *Staphylococcus aureus*, with greater inhibition observed at increasing nanoparticle concentrations and inhibition zones reaching up to approximately 20 mm for susceptible bacterial strains [11].

Other advantages of ZrO_2 are its superior mechanical properties, plus gas and temperature barrier properties [12]. The range of ZrO_2's elastic modulus (Young's modulus) is 100–250 GPa, contingent on Mindrum+2AZoM+2 composition and processing technique [13]. Certain ZrO_2 variations have compressive strengths between 1,200 and 5,200 MPa AZoM+1 and flexural strengths of 600 to 900 MPa Mindrum+1 [13]. The density is also relatively high, around 5.0–6.15 g/cm^3 AZoM+1, as well as high surface hardness (Vickers hardness) (1,200 HV depending on conditions) STC Material Solutions [14].

Nevertheless, there are still issues with ZrO_2 application, particularly with reference to EFSA/FDA regulations, production costs, sustainability, and the safety aspects of nanoparticle migration into food products [15]. The purpose of this article is to review the potential of ZrO_2 as an active packaging material, including its physicochemical characteristics, antimicrobial and antioxidant mechanisms, applications in packaging polymer systems, and its prospects for the nanotechnology-based food industry.

2. Data collection method

A structured literature review was conducted using Scopus, Web of Science, PubMed, and Google Scholar databases covering 2000–2025. Search terms included "zirconia," "zirconium dioxide," "ZrO_2," "active packaging," "nanocomposite," "film," "coating," "oxygen transmission," "water vapor transmission," "antimicrobial," "peroxide value," and "migration." Peer-reviewed studies on ZrO_2 incorporated into food-contact polymers reporting quantitative outcomes were included, while non-food or theoretical studies without measurable data were excluded. Data extraction criteria included material type, ZrO_2 loading and particle size, processing method, food model or simulant, testing metrics, and effect sizes. Extraction was verified by two reviewers, and findings were synthesized narratively with emphasis on reproducible effect sizes. Quality assessment considered adequacy of particle characterization, control samples selection, and relevance of storage conditions.

3. Characteristics of ZrO_2

Zirconium dioxide (ZrO_2) is a nanomaterial with a unique combination of properties that makes it a potential candidate for active packaging applications. This material has a stable crystal structure and distinctive physicochemical properties, supported by superior mechanical strength, thermal resistance, and optical characteristics. When compared with other nanomaterials such as TiO_2, ZnO, and AgNPs, ZrO_2 offers an attractive balance between efficacy, safety, and stability, thus making it worthy of consideration in the development of innovative packaging systems.

3.1. Crystal structure and physicochemical properties

Three primary crystal phases of ZrO_2 are found in nature: cubic (>2370 °C to melting point ±2680 °C), tetragonal (1170–2370 °C), and monoclinic (stable at ambient temperature up to ±1170 °C) [16]. Dopants like calcium or yttrium can be used to alter the phase transformation and preserve the tetragonal/cubic phase, which possesses better mechanical qualities, at room temperature [17].

On the physicochemical level, ZrO_2 is dense (5.0–6.15 g/cm^3), hard (1200 HV by the Vickers scale), and resistant to corrosion and tear-and-wear [18]. Doping ZrO_2 can increase its ionic conductivity, making it useful for gas sensors, fuel cells, and packaging [19]. Chemical stability is crucial in the food industry to avoid interactions with organic acids, lipids, or volatile product ingredients [20].

On a nanometer scale, ZrO_2 features large specific surface area (≥50–200 m^2/g depending on the synthesis method) [21]. This increases its antibacterial activity and fortifies its bond with water and oxygen molecules [22]. ZrO_2 nanoparticles have been shown in studies to suppress up to 90% of *Streptococcus mutans* and *Enterococcus faecalis* growth at exposure concentration of 22.8 μg/mL. At a concentration of 200 μg/mL, other *in vitro* tests showed inhibition zones of 18–19 mm against *Staphylococcus aureus* and *Aspergillus niger* [10,11].

3.2. Mechanical, thermal, and optical properties

ZrO_2 is known to have a high combination of strength and toughness for a ceramic manufacture [23]. It has a compressive strength of 1200–5200 MPa, a flexural strength of 600–900 MPa, and an elastic modulus between 100 and 250 GPa [24]. It is an efficient reinforcement for brittle biopolymers like PLA, chitosan, and thermoplastic starch because of its transformation toughening mechanism (tetragonal → monoclinic phase), which boosts resistance to fracture [25].

ZrO_2 functions as a stable thermal insulator even in the most severe circumstances because of its low thermal conductivity ($2 W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ at ambient temperature) and melting point of about 2680 °C [26]. ZrO_2 nanoparticles in food packaging systems can increase polymers' resistance to heat, preserving the integrity of the film during pasteurization or sterilizing procedures [27].

From an optical point of view, ZrO_2 exhibits good transparency in the visible to near-infrared spectrum and a high refractive index (2.1–2.2) [28]. This combination keeps the ZrO_2-polymer film clear and aesthetic, thus maintaining the visual appeal of the product [29].

3.3. Chemical stability and biocompatibility

ZrO_2 is frequently referred to as one of the most inert metal oxides due to its great chemical stability [30]. This characteristic is exemplified by its ability to withstand corrosion, chemical deterioration, and dissolution under diverse environmental circumstances [31]. ZrO_2 has good resistance to oxidation and is comparatively unreactive with water, mild acids, and bases at room temperature [32]. Because of this resilience, it remains stable when used in food packaging systems that are regularly exposed to reactive substances like fats, organic acids, and volatile chemicals [33]. The addition of ZrO_2 to polymer nanocomposites enhances their ability to withstand effect of oxygen and moisture while also lowering the likelihood of chemical reactions occurrences that could compromise the safety of food product [34].

ZrO_2's biocompatibility is a crucial factor that bolsters its potential for use in active packaging, in addition to its chemical stability [35]. Numerous dental materials and biomaterials investigations have demonstrated that ZrO_2 is non-toxic, it does not elicit strong immunological responses, and has a high degree of biological compatibility with bodily tissues [36,37]. According to these properties, ZrO_2 is comparatively safe when applied in small quantities to materials that have direct contact with food items [38]. ZrO_2 has a superior safety profile because of its low solubility and inert nature than other nanomaterials like Ag or ZnO, which can occasionally cause issues due to toxicity and metal ion migration [39].

However, it should be noted that the biocompatibility of ZrO_2 does not completely eliminate potential toxicological risks, especially at the nanoscale [40]. It is still required to assess bioaccumulation, biodistribution,

and long-term consequences because the extremely small particle size may enhance the likelihood of contact with biological cells through endocytosis mechanisms [41]. More research is required to establish the safe limits for their use in accordance with international regulatory standards, such as those issued by the Food and Drug Administration (FDA) or the European Food Safety Authority (EFSA), as there are currently few reports on the migration of ZrO_2 nanoparticles from packaging into food [42].

3.4. Comparison with other nanomaterials

Nanomaterials based on metal oxide and noble metals, like silver nanoparticles (AgNPs), zinc oxide (ZnO), and titanium dioxide (TiO_2), have been extensively investigated as active ingredients in food packaging systems [43]. Since each material has unique benefits and drawbacks, a comparison with ZrO_2 is necessary to comprehend this material's strategic role in the creation of active packaging [44]. Table 1 shows that each nanomaterial has specific advantages.

Titanium dioxide (TiO_2) is one of the most widely used metal oxides due to its high photocatalytic activity [45]. The production of reactive oxygen species (ROS) by TiO_2 can effectively inhibit microbial growth and slow down the oxidation of food [46]. Nevertheless, the substantial reliance on ultraviolet (UV) light exposure restricts using of this activity only to the method of creating packages that are not exposed to light continuously [47]. On the other hand, ZrO_2 has superior chemical and mechanical stability and does not require UV light activation to function, although it has lower ROS activity than TiO_2 [48]. This offers a clear benefit for packaging applications that function at low light levels.

Zinc oxide (ZnO) is known to have high antimicrobial activity against both Gram-positive and Gram-negative bacteria [49]. Additionally, ZnO is straightforward to produce on an industrial scale and it is reasonably priced [50]. However, issues related to the potential migration of Zn^{2+} ions into food and their toxicological effects still remain a major concern for the regulators [51]. Theoretically, ZrO_2 offers a superior safety profile than ZnO because of its significantly lower solubility and ion release rate [52]. ZrO_2 has a relatively mild antibacterial activity, but its stability and biocompatibility make it valuable for applications that prioritize food safety [53].

Silver nanoparticles (AgNPs) are one of the nanomaterials with the most potent antimicrobial activity that has been widely tested in the context of active packaging [54]. Although AgNPs work well at low concentrations, the certain concerns about toxicity, bioaccumulation, and possible microbial resistance restrict their long-term application [55]. Furthermore, the stability of AgNPs in polymer matrices is frequently problematic, and their production costs are comparatively high [56]. ZrO_2 is a safer option for large-scale applications due to its higher chemical stability, reduced production costs, and lesser toxicological hazards, even though it is not as effective as AgNPs at inhibiting microbial growth [57].

Figure 1 presents the fundamental characteristics of zirconium dioxide (ZrO_2), including its crystal structure, physical appearance, physicochemical properties, and superior mechanical, thermal, and optical performance.

4. Working mechanism of ZrO_2 in active packaging

The mechanism of action of ZrO_2 in active packaging systems encompasses various complementary functional aspects. First, ZrO_2 can act as an antimicrobial agent through the formation of ROS and interaction with microbial cell membranes, thus leading to disruption of cellular integrity. Second, ZrO_2 demonstrates a role as an antioxidant by inhibiting lipid and protein oxidation reactions in food, thereby suppressing the formation of compounds that cause quality degradation. Third, ZrO_2 is able to modulate the permeability of gases, including oxygen and ethylene, which contribute significantly to regulating the respiration rate of fresh produce. Fourth, the combination of these three mechanisms synergistically impacts the shelf-life extension of food by maintaining sensory quality, nutritional value, and product safety during storage.

4.1. Antimicrobial mechanisms

The antimicrobial activity of ZrO_2 is mainly associated with two main mechanisms, namely ROS formation and microbial membrane damage.

First, ZrO_2 nanoparticles' surface can initiate redox processes that result in ROS, including hydrogen peroxide (H_2O_2), superoxide anions ($O_2^{\cdot-}$), and hydroxyl radicals (·OH) [58]. This compound can lead to oxidative stress, which harms proteins, membrane lipids, and even DNA [59]. According to *in vitro* research, 90 % of the growth of *Streptococcus mutans* and *Enterococcus faecalis* may be inhibited by exposure to ZrO_2 nanoparticles at a concentration of 22.8 μg/mL [60]. In other investigations, an

Table 1. **Comparison of ZrO_2 with other nanomaterials in active packaging applications**

Таблица 1. **Сравнение ZrO_2 с другими наноматериалами при использовании в активной упаковке**

Nanomaterial	Superiority	Limitations	Relative position to ZrO_2
ZrO_2	• High chemical and mechanical stability • Relatively good biocompatibility • Low ion migration • Does not require UV activation	• Antimicrobial activity is more moderate than ZnO and AgNPs • Long-term toxicology studies are still limited	Offers a balance between effectiveness, safety and stability
TiO_2	• High photocatalytic activity • Effectively produces ROS to suppress microbes and oxidation	• Requires UV light activation • Potential for phototoxicity under certain conditions	Superior in antimicrobial or antioxidant properties when exposed to UV, but less stable than ZrO_2
ZnO	• High antimicrobial activity • Cheap and easy to produce	• Potential migration of Zn^{2+} ions • Toxicity is still debated	Stronger in biological activity, but better safety of ZrO_2
AgNPs	• Strongest antimicrobial activity • Effective at low concentrations	• High production costs • Low stability in polymers • Risk of toxicity, bioaccumulation, and microbial resistance	Superior in antimicrobial effectiveness, but ZrO_2 is safer and more economically feasible

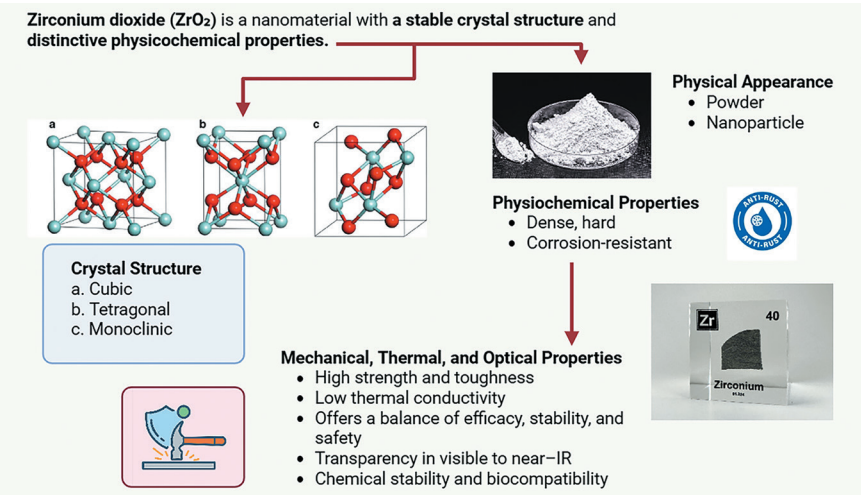


Figure 1. **Characteristics of ZrO_2 (Source: The figure was prepared by Bima Putra Pratama)**

Рисунок 1. **Характеристики ZrO_2 (Источник: рисунок подготовил Бима Путра Пратама)**

inhibitory zone of 18–19 mm was formed against *Aspergillus niger* and *Staphylococcus aureus* at a 200 µg/mL dosage [61].

Second, the antimicrobial mechanism also involves electrostatic interactions between the positively charged ZrO_2 surface and the negatively charged bacterial cell membrane [62]. These interactions cause significant outflowing ions and metabolites due to changing the permeability of the membrane. This effect is more noticeable in *E. coli* than in Gram-positive bacteria because ROS and nanoparticles can easier penetrate the weaker peptidoglycan layer [63].

4.2. Antioxidant mechanism

ZrO_2 exhibits significant antioxidant properties in addition to antibacterial activity, which helps slowing down the food spoilage process [64]. This mechanism primarily relates to its capacity to prevent lipid, protein, and other bioactive component oxidation reactions, which are frequently the primary reason why products lose their sensory appeal and nutritional value [65].

First, ZrO_2 nanoparticles act as a barrier to oxygen diffusion in the packaging polymer matrix [66]. ZrO_2 decreases oxygen permeability and slows down the rate of oxidation by increasing the density of the polymer network when it is integrated into biopolymer films [67]. This effect is especially significant for foods like vegetable oils, processed meats, and dairy products that are prone to lipid oxidation [68].

Second, the active surface of ZrO_2 can function as a free radical stabilizer [69]. ZrO_2 particles are able to adsorb peroxyl or superoxide radicals formed during the food oxidation process, thereby inhibiting oxidative chain reactions [70]. Thus, ZrO_2 functions as a "radical scavenger," preventing the production of secondary oxidation products like malondialdehyde, which can lower food's sensory quality [71].

Third, ZrO_2 has certain catalytic properties that can neutralize ROS into less harmful forms [72]. This reactivity slows the destruction of crucial biological molecules by preserving the oxidative balance around the dietary food products [73].

Numerous investigations have demonstrated that the application of polymer films containing ZrO_2 can preserve the oxidative stability of vegetable oils and reduce the development of browning and rancidity of food items rich in fat [74–76]. Therefore, ZrO_2's antioxidant mechanism is based on both its direct action in stabilizing free radicals and regulating ROS, as well as its activity as a physical barrier to oxygen.

4.3. Gas control mechanism

One of ZrO_2's key roles in active packaging systems is to control gas permeability of the package, particularly that of oxygen (O_2) and ethylene (C_2H_4), which are crucial for the stability of both processed and fresh food items [77].

First, the addition of ZrO_2 nanoparticles into the polymer matrix can improve the barrier properties against permeation of oxygen [27]. This is because ZrO_2 particles can fill in micro-gaps in the polymer network, thus increasing the density of the polymer structure and making the diffusion path of gas molecules longer and more tortuous (a phenomenon known as the tortuous path effect) [78]. This lowers down the rate of O_2 diffusion into the packaging, which consequently lowers the rate at which lipids, pigments, and bioactive ingredients in food goods oxidize [79]. Therefore, ZrO_2 serves as an oxidation controller by restricting oxygen access in addition to being a mechanical strengthening additive [80].

Second, ZrO_2 also plays a role in the regulation of ethylene, a plant gas that functions as a hormone that promotes ripening fruits and vegetables [81]. Ethylene buildup around the horticulture food products speeds up the ripening and respiration processes, eventually reducing their shelf life [82]. The active surface of ZrO_2 nanoparticles can adsorb ethylene molecules, lowering the gas's concentration in the packaged area [36]. Lowering ethylene levels prolongs the shelf life of fruits and vegetables, prevents ripening, and preserves freshness [83].

Third, the stable chemical properties of ZrO_2 allow these particles maintaining their gas control function over the long term without experiencing significant degradation [84]. In contrast, several organic additions are susceptible to structural alterations or a reduction in efficacy following repeated exposure to moisture or oxygen [85].

4.4. Effects on food shelf-life

Food shelf life has been demonstrated to be significantly impacted by the use of ZrO_2 in active packaging systems, especially in animal-origin food goods [86]. The use of chitosan film modified with ZrO_2 can inhibit the growth of spoilage germs in fresh chicken meat. This is reflected in the decrease in total plate count (TPC) by 1.2 log CFU/g after 7 days of storage at 4 °C, compared to chitosan film without adding of ZrO_2 [87]. These findings demonstrate that ZrO_2's antimicrobial action effectively reduces the rate of microbial growth, thus extending the shelf life of products and ensuring their safety for consuming.

Furthermore, ZrO_2 is crucial in reducing lipid oxidation, which is the primary cause of rancidity and a decline in nutritional value [88]. Tests on vegetable oil demonstrated that after 14 days of storage, the addition of ZrO_2 to the polymer film may lower the peroxide value by 30–40 % when compared to the control sample of the film [89]. This finding demonstrates that ZrO_2 serves as a stabilizing agent for free radicals, as it prevents oxidative chain reactions in addition to acting as a physical barrier to oxygen permeation.

Food products from horticulture also offer comparable advantages. ZrO_2-enriched PLA film was able to postpone ripening in apples by minimizing skin color changes and weight loss by up to 20 % after 14 days of storage when compared to the control batch [90]. ZrO_2's exceptional mechanical and chemical stability guarantees that this protective function lasts for a long time, in contrast to organic additives that lose their efficacy more quickly [91]. As a result, ZrO_2 exhibits significant promise as an active packaging ingredient that can prolong the shelf life of various kinds of food by involving complementary antibacterial, antioxidant, and gas control processes.

Figure 2 summarizes the main mechanisms of zirconium dioxide (ZrO_2) in active food packaging, including antimicrobial, antioxidant, and gas control functions, which collectively contribute to shelf-life extension and quality preservation.

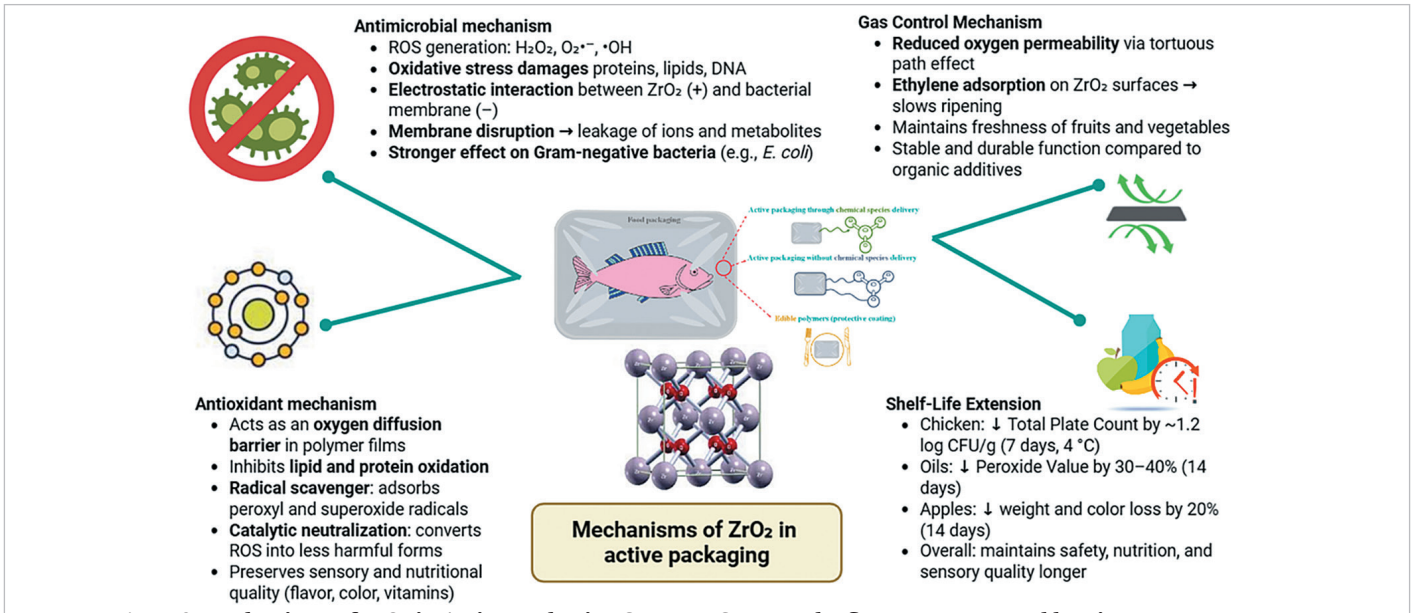


Figure 2. **Mechanisms of ZrO_2 in Active Packaging Systems (Source: The figure was prepared by Bima Putra Pratama)**

Рисунок 2. **Механизмы действия ZrO_2 в активных упаковочных системах (Источник: рисунок подготовил Бима Путра Пратама)**

5. Application of ZrO_2 in packaging systems

The application of ZrO_2 in food packaging systems is growing rapidly along with the increasing demand for packaging technologies that not only function as passive barriers but also provide active and smart protection for the food products. Its implementation can be found in various forms, ranging from ZrO_2-based polymer films and coatings that improve mechanical and barrier properties, to biopolymer -ZrO_2 nanocomposites such as polylactic acid (PLA), poly(vinyl alcohol) (PVA), chitosan, and cellulose that offer environmentally friendly alternatives with bioactive functions. Furthermore, ZrO_2 is also being explored in smart packaging concepts, for example as a food quality indicator component that is responsive to changes in the packaging environment. Various case studies and recent research reports further emphasize the great potential of ZrO_2 to support food safety, extend shelf life, and address sustainability demands in the modern packaging industry.

5.1. ZrO_2 based polymer films and coatings

The development of active packaging has focused a lot of interest on application of ZrO_2 as an additive in polymer films and coatings. ZrO_2 has been shown to enhance mechanical and thermal performance as well as barrier qualities against gases and water vapor when included into traditional polymer matrices like poly(ethylene) (PE), poly(propylene) (PP), and poly(ethylene terephthalate) (PET) [92]. According to research, PE films with 3 weight percent ZrO_2 saw a 28 % reduction in oxygen transmission rate (OTR) and a 22 % reduction in water vapor transmission rate (WVTR) when compared to control films [93].

ZrO_2 not only enhances physical characteristics but also has biological qualities. ZrO_2's antioxidant capacity to stabilize free radicals helps to slow down the oxidation of proteins and lipids, while the antibacterial activity generated by the production of ROS can inhibit the growth of contaminating microbes [12]. For instance, under cold storage conditions, PET–ZrO_2 film has been shown to prolong the shelf life of fresh beef by up to five days more than in case of using pure PET package [94].

Additionally, a ZrO_2-based thin layer (coating) on the packaging surface offers the benefits of superior optical clarity, chemical stability against oily or acidic food items, and anti-scratch qualities that boost the packaging's physical durability. This coating application has been found promising in the beverage industry, where the ZrO_2 layer on PET bottles slows the deterioration of flavor and aroma in carbonated drinks by reducing oxygen penetration by as much as 35 % [95].

5.2. Biopolymer–ZrO_2 nanocomposites

The development of biopolymer-based nanocomposites with the addition of ZrO_2 is an innovative strategy for creating active packaging that is both environmentally friendly and functional [96]. It has been demonstrated that adding 1–5 % ZrO_2 to PLA or PVA increases the film's elastic modulus by 15 %-25 % and decreases oxygen permeability down by as much as 30 % [97].

In terms of bioactive activity, chitosan–ZrO_2 showed increased effectiveness in inhibiting both Gram-positive and Gram-negative bacteria, with a decrease in total plate count (TPC) of 1.2 log CFU/g in fresh chicken meat after 7 days of storage at 4 °C [98]. PLA-ZrO_2 nanocomposites also showed higher antioxidant capacity, with a 30–40 % reduction in the peroxide value of vegetable oil after 14 days compared to the package made of pure PLA [12].

Aside from technological capabilities, sustainability features are also a benefit. ZrO_2 can improve the performance of naturally brittle biopolymers like PLA and chitosan without compromising their biodegradability [99]. ZrO_2 is a potential material for future materials that satisfy both customers' expectations for food safety and international regulatory requirements because to its greater chemical stability and biocompatibility compared to ZnO or AgNPs [100].

5.3. Smart packaging

The idea of ZrO_2 smart packaging is beginning to be investigated in the form of materials that react to modifications in the package environment. ZrO_2 nanoparticles can be mixed with gasses or dyes that are sensitive to pH to create an indicator system that changes its color in response to ethylene levels rising or pH falling caused by microbial growth [101]. According to experimental research, PVA-ZrO_2 films equipped with anthocyanin dye sensors could identify a 15 ppm rise in ethylene content by changing color in less than 12 hours [102].

This application has a lot of potential in the horticulture sector, where storage conditions have a big impact on the quality of fruits and vegetables. Therefore, ZrO_2 can promote smart packaging solutions that give the producers and the customers straightaway information about food product freshness in addition to serving as an oxidation and antibacterial barrier [103].

5.4. Recent case studies or research reports related to the application of ZrO_2

The usefulness of ZrO_2 as a functional component in active packaging systems is demonstrated by a number of recent experimental investigations and research publications. Research on ZrO_2 nanoparticle-modified polyethylene (PE) films, for instance, revealed notable enhancements in barrier qualities against oxygen and water vapor permeation, which immediately helped to prolong the shelf life of fresh meat food items [104]. Food products packaged with this film are able to maintain their bright red color and suppress the formation of rancid odors by more than twice in comparison with the conventional packaging. Table 2 summarizes the main applications of ZrO_2 in food packaging systems based on recent experimental studies and research reports.

Another study used a ZrO_2-enriched polylactic acid (PLA)-based composite to package fresh fruit. The findings demonstrated that by regulating the diffusion of oxygen and ethylene, the PLA-ZrO_2 nanocomposite not only improved the mechanical strength of the film but also successfully reduced fruit respiration [105]. This affects improving the fruit's visual freshness for longer than seven days of storage, slowing down the ripening process, and decreasing weight loss.

Apart from its use in fresh food, chitosan–ZrO_2 nanocomposites have also been shown to be successful in preventing the growth of microorganisms in processed meat and fish products. The antibacterial action that results from combining chitosan with ZrO_2 can effectively inhibit the populations of *Staphylococcus aureus* and *Escherichia coli*. It can also slow down lipid oxidation, which is the primary cause of rancidity occurrence [106].

The possibility of using ZrO_2 in smart packaging is also examined in the most recent study report. For instance, ZrO_2 is a component of an optical sensor that is sensitive to volatile gasses created during food deterioration and pH variations [107]. Both producers and customers can use this method to monitor the quality of products in real time without opening the package.

Figure 3 illustrates the diverse applications of zirconium dioxide (ZrO_2) in food packaging systems, including polymer films and coatings, biopolymer–ZrO_2 nanocomposites, and smart packaging concepts.

6. Safety and regulation

Safety and regulatory aspects are crucial factors determining the feasibility of ZrO_2 application in active packaging systems. A thorough evaluation of ZrO_2 toxicity is necessary to ensure that this material does not cause adverse effects on consumer health. Furthermore, the potential migration of ZrO_2 particles into food is a crucial issue that must be studied, given that direct interaction between packaging and food products can impact consumption safety. From a policy perspective, the regulatory

Table 2. **Application of ZrO_2 in various food packaging systems and its impact on product quality**

Таблица 2. **Применение ZrO_2 в различных упаковочных системах для пищевых продуктов, и его влияние на качество пищевого продукта**

ZrO_2 based packaging system	Test product	Main mechanism	Impact on products	Reference
Polyethylene (PE) film + ZrO_2	Fresh meat	Increased barrier to O_2 and H_2O; suppression of lipid oxidation	Colors remain bright; reduced rancid odor; shelf life > 2× regular packaging	[104]
PLA–ZrO_2 nanocomposite	Fresh fruit	Decreased diffusion of O_2/ethylene; increased mechanical strength	Fruit respiration slows; weight loss decreases; freshness is maintained for > 7 days	[105]
Chitosan–ZrO_2 nanocomposite	Processed meat and fish	Combination of antimicrobial properties of chitosan + ROS from ZrO_2; antioxidant effect	*E. coli* and *S. aureus* populations decreased; rancidity was reduced	[106]
ZrO_2-based smart packaging (optical sensor)	Perishable food products	Responsive to pH and volatile gases resulting from degradation	Real-time product quality monitoring without opening the packaging	[107]

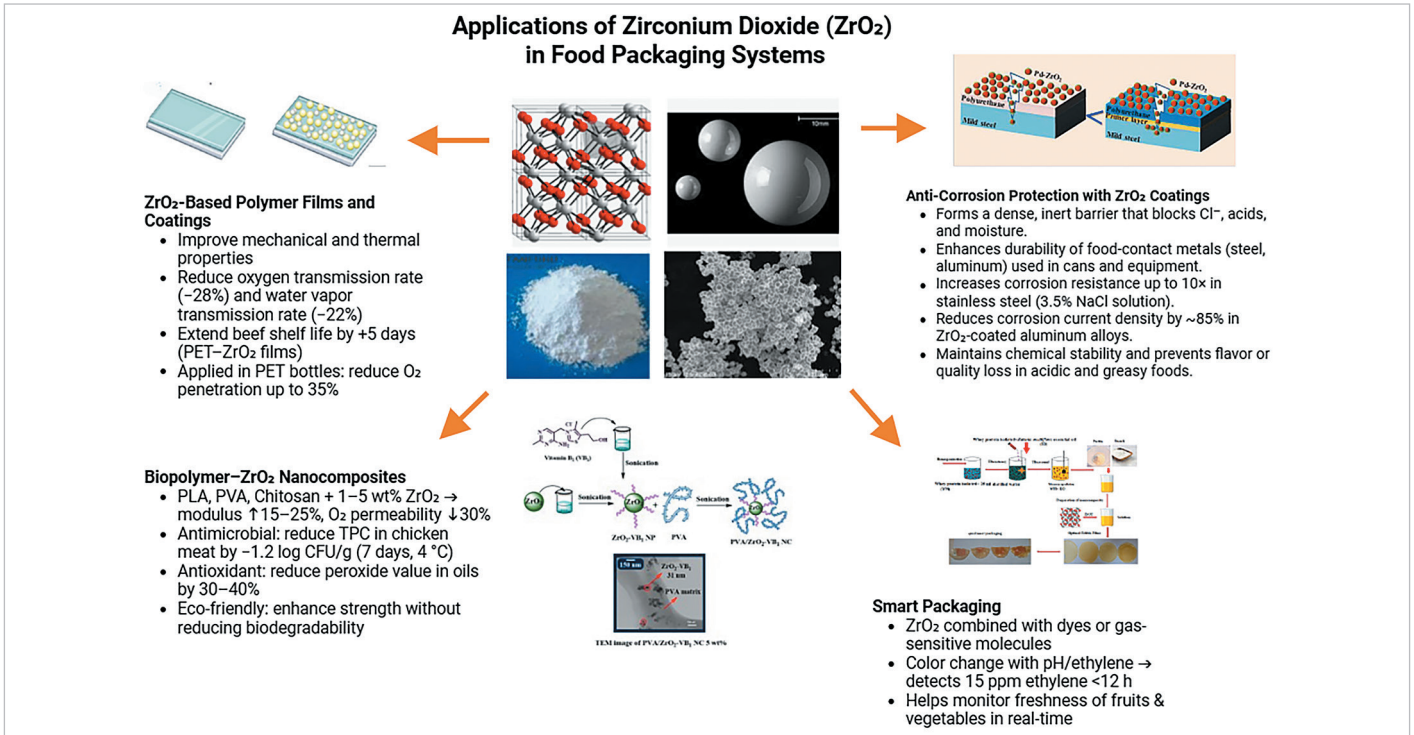


Figure 3. **Applications of ZrO_2 in Food Packaging Systems (Source: The figure was prepared by Bima Putra Pratama)**

Рисунок 3. **Применение ZrO_2 в упаковочных системах для пищевых продуктов (Источник: рисунок подготовил Бима Путра Пратама)**

status of ZrO_2 has received attention from various international authoritative bodies such as the European Food Safety Authority (EFSA), the Food and Drug Administration (FDA), and other standards bodies, which establish guidelines for use and safety limits. Furthermore, discussions on environmental and sustainability issues are also relevant, as the use of nanotechnology-based materials must be in line with sustainability principles, including potential impacts on ecosystems and the life cycle of food packaging.

6.1. Toxicity evaluation of ZrO_2

Toxicity assessment is a fundamental step to ensure the safety of using ZrO_2 in food packaging systems [108]. ZrO_2 is a highly biocompatible ceramic that finds its extensive application in industrial catalysts, dentistry, and orthopedics, demonstrating its chemical stability and relative inertness [109]. However, variations in particle size, particularly when it comes to nanoparticles, might impact their biological interactions and provide possible hazards that should be taken into account. Table 3 summarizes the main findings related to the toxicological aspects of ZrO_2 in the context of food packaging applications.

According to *in vitro* toxicology research, ZrO_2 nanoparticles typically do not significantly provide cytotoxical effect onto the various mammalian cell lines at low concentrations exposure. However, high levels of exposure can cause ROS to be produced, which can lead to cellular death, DNA damage, and oxidative stress [110]. This effect is greatly influenced by particle size, specific surface area, and dispersion stability in the biological medium.

According to *in vivo* research conducted on experimental animals, ZrO_2 has a less hazardous toxicological profile than a number of other metal nanoparticles, including Ag and TiO_2. Significant histopathological alterations in vital organs are not caused by oral exposure at specific levels, albeit particle accumulation may happen, particularly in the liver and kidneys [111]. This highlights the significance of additional researches on a body's biodistribution, metabolism and excretion of ZrO_2.

Concerns have been raised about the possibility of long-term interactions between ZrO_2 nanoparticles and biological components in addition to the immediate cytotoxic consequences [112]. For this reason, a thorough toxicological assessment that includes testing for its mutagenicity, carcinogenicity, and reproductive impacts is required in order to create a reliable safety database.

6.2. Migration of particles into food

One of the primary factors influencing the safety of its use is the migration of particles from packing materials into food [113]. Given that ZrO_2 can be used as nanoparticles, which have a higher surface area and higher reactivity than the bulk form, the migration issue becomes especially pertinent in this context [41].

In general, the size and distribution of ZrO_2 particles, the physicochemical characteristics of the matrix polymer, the type of food packaged, and the storage conditions (temperature, humidity, and pH) all affect particles migration [114]. Oily, fatty or acidic types of food are known to be more prone to particles absorption or leaching than foods that are dry [115]. As a result, every combination of food product and packaging material needs a specific migration test.

According to a number of studies, ZrO_2 tends to have a low migration rate because it is relatively stable in polymer matrices [116–118]. For instance, under typical storage circumstances, ZrO_2 applied to polyethylene and PLA-based films did not significantly leak into aqueous, fatty, or acidic food simulants. This is explained byo ZrO_2's exceptional chemical

Table 3. **Toxicological findings of ZrO_2 in food packaging**

Таблица 3. **Результаты токсикологических исследований применения ZrO_2 в упаковке пищевых продуктов**

Test aspects	Main findings	Factor affecting	Scientific explanation	Reference
In vitro test	Low concentration: no significant cytotoxicity. High concentration: increased ROS, oxidative stress, DNA damage, cellular apoptosis.	Particle size, specific surface area, and dispersion stability.	Nanoparticles are more reactive than bulk ZrO_2 due to their higher surface area/volume ratio.	[110]
In vivo test	The toxicological profile is relatively safe compared to TiO_2 and Ag. Oral exposure does not cause major histopathological changes.	Exposure dose, route of entry (oral and inhalation), and biological distribution.	Accumulation may occur in the liver and kidneys, although without significant organ damage at moderate doses.	[111]
Long-term biological interactions	Potential accumulation of particles in tissues, possible effects on the immune system and chronic oxidative stress.	Duration of exposure, metabolism, and excretion capacity.	Data are still limited, mutagenicity, carcinogenicity and reproductive effects studies are needed.	[119]
Comparative safety	More biocompatible than other metal nanoparticles (Ag and TiO_2).	Application context (dentistry, orthopedics, and food).	High chemical stability supports its use, but the food toxicology database is still limited.	[120]

resistance and inert nature, which make it more difficult to dissolve, dilute or disseminate [119]. Nonetheless, it is still necessary to consider the potential for ion or nanoparticle fragment release under extreme circumstances, like high temperatures or prolonged contact.

According to regulatory authorities like EFSA, migration testing is a prerequisite for approving a nanomaterial for its using in food packaging [15]. The results of the test evaluate both the quantity of migrating particles and their chemical composition, as intact nanoparticles may exhibit behaviors distinguishing from dissolved ions.

6.3. Regulatory status

Regulatory aspects are an important element in determining the suitability of a material for its using in food packaging systems [120]. Numerous worldwide governing authorities have taken notice of ZrO_2 because of its longstanding reputation as a highly biocompatible and chemically stable substance.

The European Commission, acting on behalf of the European Food Safety Authority (EFSA), has added ZrO_2 to the list of additives that are allowed to come into contact with food in the EU under specific circumstances [121]. ZrO_2 is classified as an inorganic additive with a strict specific migration limit (SML) to ensure no excessive release into food, in accordance with Commission Regulation (EU) No. 10/2011 on plastic materials and articles intended to come into contact with food. When used in accordance with the established norms, ZrO_2 exhibits little toxicological risk and high stability, as confirmed by the EFSA evaluation report [122].

The Food and Drug Administration (FDA) in the US has approved the use of ZrO_2 being generally regarded as safe (GRAS) for a number of applications, such as polymer additive and ceramic component intended for packaging [123]. The Code of Federal Regulations (CFR), which regulated using of ZrO_2 in polymers that come into direct contact with food, places a strong emphasis on the requirement that its use must be in safe concentrations and must not migrate in proportions that could be harmful to human health [124].

The safety of metal-based compounds and inorganic oxides, including ZrO_2, is also reviewed by other international organizations outside the FDA and EFSA, such as the Food and Agriculture Organization (FAO)/World Health Organization (WHO) Joint Expert Committee on Food Additives (JECFA) [125]. Even though there aren't much specific statistics on ZrO_2 compared to other metal oxides (such TiO_2), initial assessments suggest that this material is of low-risk, particularly when it comes to bulk form [126].

The application of ZrO_2 nanoparticles still needs further evaluation, nevertheless, because their nanoscale properties may result in biological interactions which differ from those of conventional forms. Consequently, several international rules require that all applications based on nanomaterials should go through extensive toxicological investigations, safety tests, and migration tests before being approved for commercial application and distribution.

6.4. Environmental and sustainability issues

The application of ZrO_2 in food packaging has consequences for sustainability and the environment in addition to consumers safety [127]. In this context, two main issues need to be considered, namely the life cycle impacts of the material and the potential accumulation of particles in the environment.

According to a life cycle assessment (LCA), the process of producing ZrO_2 entails the extraction and refinement of the mineral zirconium, which generates industrial waste and significant energy requirements [128]. Nonetheless, packaging enhanced with ZrO_2 is typically more durable, it reduces the need for its replacement, and may even lower the amount of packaging waste because of its well-known chemical stability and long-term durability [27]. In other words, if ZrO_2 is used in a system that involves recycling or reuse, it can help with resources management efficiency.

The potential buildup of ZrO_2 nanoparticles in the environment is another issue. Its tiny particles can interact with soil and water microbes despite being chemically inert and comparatively insoluble in water [126]. Long-term study is still scarce, but preliminary studies have indicated that ZrO_2 nanoparticles are less harmful to the environment than other metal oxides like ZnO or CuO [129]. Thus, more thorough ecotoxicological research is required to comprehend the possible effects on the food chain and biodiversity.

The combination of ZrO_2 and renewable biopolymers (such as PLA, chitosan, or cellulose) presents strategic potential within the framework of sustainability maintenance. This combination is more biodegradable than polymers derived from fossil fuels, and it creates packaging that is both active and functional [130]. Furthermore, ZrO_2's durability permits mechanical and thermal recycling without causing appreciable deterioration, thus promoting a circular economy in the packaging recycling industry [131].

7. Challenges and prospects for development

There are still a number of technical obstacles to overcome before ZrO_2 can be used on an industrial scale, despite its immense potential as an active packaging component. The challenge of production scale, specifically preserving a uniform dispersion of ZrO_2 nanoparticles in the polymer matrix without their cluster agglomeration, is one of the primary issue [132]. The long-term functional stability of ZrO_2 is also a concern, as interactions with environmental factors (e.g., humidity, light, and high temperatures) can affect its bioactive properties [116]. Furthermore, formulation adjustment is necessary to find the best relevant compatibility with specific polymers, both conventional and biopolymers, in order to avoid deterioration of the packaging film's mechanical qualities [133].

The primary limitations from an economic standpoint are the costs of materials and the manufacturing process. High-quality ZrO_2 nanoparticle production is still somewhat costly, which raises the packaging product's final cost [36]. The use of ZrO_2-based nanocomposite technology also necessitates advanced manufacturing infrastructure, including chemical vapor deposition, sol–gel, and nanoscale controlled extrusion procedures [134]. This makes it difficult to compete on pricing with more established and less expensive traditional packaging materials.

Safety and regulatory considerations are equally crucial. Despite the fact that ZrO_2 in bulk has been acknowledged as being somewhat safe, its use in nanoparticle form is nevertheless strictly regulated by the regulatory agencies like the FDA and EFSA [135,136]. Toxicological tests, specific migration tests, and long-term ecotoxicological studies are necessary to conduct in order to ensure consumers' and environmental safety. The adoption of innovative technology is frequently slowed down by regulatory uncertainties around nanoparticles since businesses must incur additional costs to comply with international norms [137].

Nonetheless, there is still bright future potential for using ZrO_2 in food packaging. It is possible to create environmentally friendly and functional active packaging by integrating biodegradable materials like PLA, chitosan, and cellulose [138]. Furthermore, the adoption of green synthesis technologies can lower down the manufacturing costs and lessen its effects on the environment, for instance by using low-energy techniques or natural precursors [139]. Meanwhile, advances in materials engineering and nanotechnology are moving ZrO_2 closer to its possible commercialization, particularly for expensive high-end food items that need more defense against oxidation and microbial contamination [140].

9. Conclusion

This review demonstrates that ZrO_2 is able to provide simultaneously antimicrobial, antioxidant, and gas-barrier functions when incorporated into commodity package and bio-based polymers, with reproducible quantitative effects on food quality and shelf-life. Compared with other oxides and AgNPs, ZrO_2 offers a distinctive balance: moderate but reliable bioactivity, high chemical and mechanical stability, optical compatibility, and low migration rate under normal conditions of using.

These characteristics make ZrO_2 a strong candidate for clean-label and sustainability-oriented packaging. Future research should prioritize standardized toxicology analysis and generation of migration control protocols for nanoscale ZrO_2 in realistic food systems, optimization of its spreading at industrial scale, and life-cycle analyses for integration with recycling and biodegradable polymers combinations. Such approaches will clarify its long-term safety and commercial potential for high-end food packaging applications.

REFERENCES

1. Pascall, M. A., DeAngelo, K., Richards, J., Arensberg, M. B. (2022). Role and importance of functional food packaging in specialized products for vulnerable populations: Implications for innovation and policy development for sustainability. *Foods*, 11(19), Article 3043. https://doi.org/10.3390/foods11193043
2. Jadhav, E. B., Sankhla, M. S., Bhat, R. A., Bhagat, D. S. (2021). Microplastics from food packaging: An overview of human consumption, health threats, and alternative solutions. *Environmental Nanotechnology, Monitoring and Management*, 16(1), Article 100608. https://doi.org/10.1016/j.enmm.2021.100608
3. da Costa Monção, É., Grisi, C. V. B., de Moura Fernandes, J., Souza, P. S., de Souza, A. L. (2022). Active packaging for lipid foods and development challenges for marketing. *Food Bioscience*, 45(2), Article 101370. https://doi.org/10.1016/j.fbio.2021.101370

4. Mesías, F. J., Martín, A., Hernández, A. (2021). Consumers' growing appetite for natural foods: Perceptions towards the use of natural preservatives in fresh fruit. *Food Research International*, 150(Part A), Article 110749. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2021.110749
5. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2013). Food wastage footprint: Impacts on natural resources. Rome: FAO, 2013.
6. Mafe, A. N., Edo, G. I., Makia, R. S., Joshua, O. A., Akpoghelie, P. O., Gaaz, T. S. et al. (2024). A review on food spoilage mechanisms, food borne diseases and commercial aspects of food preservation and processing. *Food Chemistry Advances*, 5, Article 100852. https://doi.org/10.1016/j.focha.2024.100852
7. Guzik, P., Szymkowiak, A., Kulawik, P., Zając, M. (2022). Consumer attitudes towards food preservation methods. *Foods*, 11(9), Article 1349. https://doi.org/10.3390/foods11091349
8. Szczyglewska, P., Feliczak-Guzik, A., Nowak, I. (2023). Nanotechnology — General aspects: A chemical reduction approach to the synthesis of nanoparticles. *Molecules*, 28(13), Article 4932. https://doi.org/10.3390/molecules28134932
9. Petousis, M., Moutsopoulou, A., Korlos, A., Papadakis, V., Mountakis, N., Tsikritzis, D. et al. (2023). The effect of nano zirconium dioxide (ZrO_2)-optimized content in polyamide 12 (PA12) and polylactic acid (PLA) matrices on their thermomechanical response in 3D printing. Nanomaterials, 13(13), Article 1906. https://doi.org/10.3390/nano13131906
10. Pandian, A. P. G., Ramachandran, A. K., Pitchumani, P. K., Mathai, B., Thomas, D. C. (2024). Anti-bacterial efficacy of zirconium oxide nanoparticles on Streptococcus mutans and Enterococcus faecalis: An in vitro study. *Cureus*, 16(12), Article e75421. https://doi.org/10.7759/cureus.75421
11. Fathima, J. B., Pugazhendhi, A., Venis, R. (2017). Synthesis and characterization of ZrO_2 nanoparticles-antimicrobial activity and their prospective role in dental care. *Microbial Pathogenesis*, 110(1), 245–251. https://doi.org/10.1016/j.micpath.2017.06.039
12. Bannunah, A. M. (2023). Biomedical applications of zirconia-based nanomaterials: Challenges and future perspectives. *Molecules*, 28(14), Article 5428. https://doi.org/10.3390/molecules28145428
13. Zhao, X.-S., Shang, S.-L., Liu, Z.-K., Shen, J.-Y. (2011). Elastic properties of cubic, tetragonal and monoclinic ZrO_2 from first-principles calculations. *Journal of Nuclear Materials*, 415(1), 13–17. https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2011.05.016
14. Kondo, T., Muta, H., Kurosaki, K., Kargl, F., Yamaji, A., Furuya, M. et al. (2019). Density and viscosity of liquid ZrO_2 measured by aerodynamic levitation technique. *Heliyon*, 5(7), Article e02049. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02049
15. Paidari, S., Tahergorabi, R., Anari, E. S., Nafchi, A. M., Zamindar, N., Goli, M. (2021). Migration of various nanoparticles into food samples: A review. *Foods*, 10(9), Article 2114. https://doi.org/10.3390/foods10092114
16. Yang, C., Liu, X. (2025). Research progress on the sintering techniques of zirconia in prosthetic dentistry. *Ceramics*, 8(3), Article 118. https://doi.org/10.3390/ceramics8030118
17. Basu, B., Vleugels, J., Van Der Biest, O. (2004). Transformation behaviour of tetragonal zirconia: Role of dopant content and distribution. *Materials Science and Engineering: A*, 366(2), 338–347. https://doi.org/10.1016/j.msea.2003.08.063
18. Feng, P., Shi, Y., Shang, P., Peng, T., Feng, R., Li, B. et al. (2023). Study of ZrO_2 content on hardness and wear characteristic of coatings. *Journal of Physics: Conference Series*, 2437(1), Article 012034. https://doi.org/10.1088/1742-6596/2437/1/012034
19. Petriceanu, M., Ioniță, F. G., Piticescu, R. R., Nicoară, A. I., Matei, A. C., Ioța, M. A. et al. (2024). Effect of doping ZrO_2 on structural and thermal properties. *Inorganics*, 12(11), Article 290. https://doi.org/10.3390/inorganics12110290
20. Matei, E., Şăulean, A.-A., Petriceanu, M., Râpă, M., Piticescu, R. R., Ştefănoiu, R. et al. (2024). Environmental sustainability based on zirconium dioxide utilization in non-conventional energy applications. *Environments*, 11(12), Article 265. https://doi.org/10.3390/environments11120265
21. Navío, J. A., Hidalgo, M. C., Colón, G., Botta, S. G., Litter, M. I. (2001). Preparation and physicochemical properties of ZrO_2 and Fe/ZrO_2 prepared by a sol-gel technique. *Langmuir*, 17(1), 202–210. https://doi.org/10.1021/la000897d
22. Thamir, A. A., Jubier, N. J., Odah, J. F. (2021). Antimicrobial activity of zirconium oxide nanoparticles prepared by the sol-gel method. *Journal of Physics: Conference Series*, 2114(1), Article 012058. https://doi.org/10.1088/1742-6596/2114/1/012058
23. Qi, B., Liang, S., Li, Y., Zhou, C., Yu, H., Li, J. (2022). ZrO_2 matrix toughened ceramic material — Strength and toughness. *Advanced Engineering Materials*, 24(6), Article 2101278. http://doi.org/10.1002/adem.202101278
24. Zidan, S., Silikas, N., Alhotan, A., Haider, J., Yates, J. (2019). Investigating the mechanical properties of ZrO_2-impregnated PMMA nanocomposite for denture-based applications. *Materials*, 12(8), Article 1344. https://doi.org/10.3390/ma12081344
25. Pathak, B., Maskey, B., Bhochhibhoya, A., Devkota, D. (2022). Transformation-toughened zirconia: An overview. *Journal of Nepalese Prosthodontic Society*, 5(1), 19–24. https://doi.org/10.3126/jnprossoc.v5i1.53394
26. Zhu, Z., Wang, X., Zhang, X., Ma, D., Guo, Z., Zhang, G. et al. (2024). High transmittance and ultra-low thermal conductivity ZrO_2 aerogel via zirconium hydroxyacetate precursor. *Ceramics International*, 50(3), 4423–4432. http://doi.org/10.1016/j.ceramint.2023.11.153
27. Alshammari, K., Atta, A., Alshammari, M., Alhassan, S., Alshammari, A. H. (2025). Impact of ZrO_2 nanoparticles on surface, thermal, and structural properties of PVA/ZrO_2 composite films for advanced flexible electronics applications. *Surfaces and Interfaces*, 59(1), Article 105964. https://doi.org/10.1016/j.surfin.2025.105964
28. Peuchert, U., Okano, Y., Menke, Y., Reichel, S., Ikesue, A. (2009). Transparent cubic-ZrO_2 ceramics for application as optical lenses. *Journal of the European Ceramic Society*, 29(2), 283–291. http://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2008.03.028
29. Masheder, B., Urata, C., Hozumi, A. (2013). Transparent and hard zirconia-based hybrid coatings with excellent dynamic/thermoresponsive oleophobicity, thermal durability, and hydrolytic stability. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 5(16), 7899–7905. https://doi.org/10.1021/am401992h
30. Kong, L., Karatchevtseva, I., Wei, T., Veliscek-Carolan, J. (2024). Synthesis of mesoporous tetragonal ZrO_2, TiO_2 and solid solutions and effect of colloidal silica on porosity. *Molecules*, 29(14), Article 3278. https://doi.org/10.3390/molecules29143278
31. Jiang, G., Xu, D., Liu, J., Yang, J., Li, Y., Kuang, W. (2024). Corrosion protection and failure mechanism of ZrO_2 coating on zirconium alloy Zry-4 under varied LiOH concentrations in lithiated water at 360 °C/18.5 MPa. *Applied Surface Science*, 650(1), Article 159173. https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2023.159173
32. Qiu, L., Guzonas, D. A., Webb, D. G. (2009). Zirconium dioxide solubility in high temperature aqueous solutions. *Journal of Solution Chemistry*, 38(1), 857–867. https://doi.org/10.1007/s10953-009-9412-5
33. Tellez-Barrios, G., Cadenas-Pliego, G., Toledo-Manuel, I., Pérez-Alvarez, M., Alvarado-Canche, C. N., Mancillas-Salas, S. et al. (2025). Surface modification of TiO_2 and ZrO_2 nanoparticles with organic acids and ultrasound to enhance antibacterial activity. *Materials*, 18(12), Article 2786. https://doi.org/10.3390/ma18122786
34. Mallakpour, S., Ezhieh, A. N. (2017). Polymer nanocomposites based on modified ZrO_2 NPs and poly(vinyl alcohol)/poly(vinyl pyrrolidone) blend: Optical, morphological, and thermal properties. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 56(10), 1136–1145. http://doi.org/10.1080/03602559.2016.1253741
35. Song, T., Qian, S., Lan, T., Wu, Y., Liu, J., Zhang, H. (2022). Recent advances in bio-based smart active packaging materials. *Foods*, 11(15), Article 2228. https://doi.org/10.3390/foods11152228
36. Radu (Dusman), R.-D., Drăgănescu, D. (2023). Present and future of ZrO_2 nanostructure as reservoir for drug loading and release. *Coatings*, 13(7), Article 1273. https://doi.org/10.3390/coatings13071273
37. Singh, P. V., Reche, A., Paul, P., Agarwal, S. (2023). Zirconia facts and perspectives for biomaterials in dental implantology. *Cureus*, 15(10), Article e46828. https://doi.org/10.7759/cureus.46828
38. Hichem, N., Hadjer, Z., Fateh, S., Feriel, L., Wang, Z. (2022). The potential exposure and hazards of zirconia nanoparticles: A review. *Ecotoxicology and Environmental Contamination*, 17(1), 1–21. https://doi.org/10.5132/eec.2022.01.01
39. Ayanwale, A. P., Reyes-López, S. Y. (2019). ZrO_2-ZnO nanoparticles as antibacterial agents. *ACS Omega*, 4(21), 19216–19224. https://doi.org/10.1021/acsomega.9b02527
40. Li, Q., Deacon, A. D., Coleman, N. J. (2013). The impact of zirconium oxide nanoparticles on the hydration chemistry and biocompatibility of white Portland cement. *Dental Materials Journal*, 32(5), 808–815. https://doi.org/10.4012/dmj.2013-113
41. Tran, T. V., Nguyen, D. T. C., Kumar, P. S., Din, A. T. M., Jalil, A. A., Vo, D.-V. N. (2022). Green synthesis of ZrO_2 nanoparticles and nanocomposites for biomedical and environmental applications: A review. *Environmental Chemistry Letters*, 20(2), 1309–1331. https://doi.org/10.1007/s10311-021-01367-9
42. Hardy, A., Benford, D., Halldorsson, T., Jeger, M. J., Knutsen, H. K., More, S. et al. (2018). Guidance on risk assessment of the application of nanoscience and nanotechnologies in the food and feed chain: Part 1, human and animal health. *EFSA Journal*, 16(7), Article e05327. https://doi.org/10.2903/j.efsa.2018.5327
43. Ashfaq, A., Khursheed, N., Fatima, S., Anjum, Z., Younis, K. (2022). Application of nanotechnology in food packaging: Pros and cons. *Journal of Agriculture and Food Research*, 7(1), Article 100270. https://doi.org/10.1016/j.jafr.2022.100270
44. Jiang, Y., Zhang, Y., Deng, Y. (2023). Latest advances in active materials for food packaging and their application. *Foods*, 12(22), Article 4055. https://doi.org/10.3390/foods12224055
45. Anucha, C. B., Altin, I., Bacaksiz, E., Stathopoulos, V. N. (2022). Titanium dioxide (TiO_2)-based photocatalyst materials activity enhancement for contaminants of emerging concern degradation: In the light of modification strategies. *Chemical Engineering Journal Advances*, 10(1), Article 100262. https://doi.org/10.1016/j.ceja.2022.100262
46. Li, J., Zhang, D., Hou, C. (2025). Application of nano-titanium dioxide in food antibacterial packaging materials. *Bioengineering*, 12(1), Article 19. https://doi.org/10.3390/bioengineering12010019
47. Darré, M., Vicente, A. R., Cisneros-Zevallos, L., Artés-Hernández, F. (2022). Postharvest ultraviolet radiation in fruit and vegetables: Applications and factors modulating its efficacy on bioactive compounds and microbial growth. *Foods*, 11(5), Article 653. https://doi.org/10.3390/foods11050653
48. Pirzada, B. M., Mir, N. A., Qutub, N., Mehraj, O., Sabir, S., Muneer, M. (2015). Synthesis, characterization and optimization of photocatalytic activity of TiO_2/ZrO_2 nanocomposite heterostructures. *Materials Science and Engineering: B*, 193(1), 137–145. https://doi.org/10.1016/j.mseb.2014.12.005
49. Giedraitienė, A., Ružauskas, M., Šiugždinienė, R., Tučkutė, S., Grigonis, K., Milčius, D. (2024). ZnO nanoparticles enhance the antimicrobial properties of two-sided-coated cotton textile. *Nanomaterials*, 14(15), Article 1264. https://doi.org/10.3390/nano14151264
50. Šutka, A., Mežule, L., Denisova, V., Meier-Haack, J., Kulkarni, A., Bitina, S. et al. (2022). Straightforward approach for preparing durable antibacterial ZnO nanoparticle coatings on flexible substrates. *Molecules*, 27(22), Article 7672. https://doi.org/10.3390/molecules27227672
51. Perumal, M. K. K., Rajasekaran, M. B. S., Renuka, R. R., Samrot, A. V., Nagarajan, M. (2025). Zinc oxide nanoparticles and their nanocomposites as an imperative coating for smart food packaging. *Applied Food Research*, 5(1), Article 100849. https://doi.org/10.1016/j.afres.2025.100849
52. Lebaka, V. R., Ravi, P., Reddy, M. C., Thummala, C., Mandal, T. K. (2025). Zinc oxide nanoparticles in modern science and technology: Multifunctional roles in healthcare, environmental remediation, and industry. *Nanomaterials*, 15(10), Article 754. https://doi.org/10.3390/nano15100754
53. Ayanwale, A. P., Ruíz-Baltazar, A. J., Espinoza-Cristóbal, L., Reyes-López, S. Y. (2020). Bactericidal activity study of ZrO_2-Ag_2O nanoparticles. *Dose Response*, 18(3), Article 1559325820941374. https://doi.org/10.1177/1559325820941374
54. Jangid, H., Singh, S., Kashyap, P., Singh, A., Kumar, G. (2024). Advancing biomedical applications: An in-depth analysis of silver nanoparticles in antimicrobial, anticancer, and wound healing roles. *Frontiers in Pharmacology*, 15(1), Article 1438227. https://doi.org/10.3389/fphar.2024.1438227
55. Xu, L., Wang, Y. -Y., Huang, J., Chen, C. -Y., Wang, Z. -X., Xie, H. (2020). Silver nanoparticles: Synthesis, medical applications and biosafety. *Theranostics*, 10(20), 8996–9031. https://doi.org/10.7150/thno.45413
56. Abdelmoneim, H. M., Taha, T. H., Alhudhaibi, A. M., Afifi, F. M., Faqihi, A. A., Alsalamah, S. A. et al. (2025). Green synthesis of silver nanoparticles and polymeric nanofiber composites: Fabrications, mechanisms, and applications. *Polymers*, 17(17), Article 2327. https://doi.org/10.3390/polym17172327

57. Harun-Ur-Rashid, M., Foyez, T., Krishna, S. B. N., Poda, S., Imran, A. B. (2025). Recent advances of silver nanoparticle-based polymer nanocomposites for biomedical applications. *RSC Advances*, 15(11), 8480–8505. https://doi.org/10.1039/d4ra08220f
58. Sobańska, K., Pietrzyk, P., Sojka, Z. (2017). Generation of reactive oxygen species via electroprotic interaction of H_2O_2 with ZrO_2 gel: Ionic sponge effect and pH-switchable peroxidase- and catalase-like activity. *ACS Catalysis*, 7(4), 2935–2947. https://doi.org/10.1021/acscatal.7b00189
59. Jomova, K., Raptova, R., Alomar, S. Y., Alwasel, S. H., Nepovimova, E., Kuca, K. et al. (2023). Reactive oxygen species, toxicity, oxidative stress, and antioxidants: Chronic diseases and aging. *Archives of Toxicology*, 97(10), 2499–2574. https://doi.org/10.1007/s00204-023-03562-9
60. Pandian, A. P. G., Ramachandran, A. K., Pitchumani, P. K., Mathai, B., Thomas, D. C. (2025). Evaluation of anti-biofilm property of zirconium oxide nanoparticles on *Streptococcus mutans* and *Enterococcus faecalis*: An in vitro study. *Cureus*, 17(1), Article e77199. https://doi.org/10.7759/cureus.77199
61. Jangra, S. L., Stalin, K., Dilbaghi, N., Kumar, S., Tawale, J., Singh, S. P. et al. (2012). Antimicrobial activity of zirconia (ZrO_2) nanoparticles and zirconium complexes. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 12(9), 7105–7112. https://doi.org/10.1166/jnn.2012.6574
62. Agarwalla, A., Ahmed, W., Al-Marzouqi, A. H., Rizvi, T. A., Khan, M., Zaneldin, E. (2023). Characteristics and key features of antimicrobial materials and associated mechanisms for diverse applications. *Molecules*, 28(24), Article 8041. https://doi.org/10.3390/molecules28248041
63. Tabassum, N., Kumar, D., Verma, D., Bohara, R. A., Singh, M. P. (2021). Zirconium oxide (ZrO_2) nanoparticles from antibacterial activity to cytotoxicity: A next-generation of multifunctional nanoparticles. *Materials Today Communications*, 26(12), Article 102156. https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2021.102156
64. Narasaiah, B. P., Koppala, S., Kar, P., Lokesh, B., Mandal, B. K. (2022). Photocatalytic and antioxidant studies of bioinspired ZrO_2 nanoparticles using agriculture waste durva grass aqueous extracts. *Journal of Hazardous Materials Advances*, 7(1), Article 100112. https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2022.100112
65. Geng, L., Liu, K., Zhang, H. (2023). Lipid oxidation in foods and its implications on proteins. *Frontiers in Nutrition*, 10(1), Article 1192199. https://doi.org/10.3389/fnut.2023.1192199
66. Prusty, G., Swain, S. K. (2013). Dispersion of ZrO_2 nanoparticles in polyacrylonitrile: Preparation of thermally-resistant electrically-conductive oxygen barrier nanocomposites. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 16(6), 2039–2043. https://doi.org/10.1016/j.mssp.2013.07.033
67. Sciti, D., Brach, M., Bellosi, A. (2005). Long-term oxidation behavior and mechanical strength degradation of a pressurelessly sintered ZrB_2-$MoSi_2$ ceramic. *Scripta Materialia*, 53(11), 1297–1302. https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2005.07.026
68. Ansorena, D., Ramírez, R., de Cerain, A. L., Azqueta, A., Astiasaran, I. (2023). Oxidative stability and genotoxic activity of vegetable oils subjected to accelerated oxidation and cooking conditions. *Foods*, 12(11), Article 2186. https://doi.org/10.3390/foods12112186
69. Scholz, S., Kaskel, S. (2008). Surface functionalization of ZrO_2 nanocrystallites for the integration into acrylate nanocomposite films. *Journal of Colloid and Interface Science*, 323(1), 84–91. https://doi.org/10.1016/j.jcis.2008.03.051
70. Martemucci, G., Costagliola, C., Mariano, M., D'Andrea, L., Napolitano, P., D'Alessandro, A. G. (2022). Free radical properties, source and targets, antioxidant consumption and health. *Oxygen*, 2(2), 48–78. https://doi.org/10.3390/oxygen2020006
71. Simon, S. M., Chandran, A., George, G., Sajna, M. S., Valparambil, P., Kumi-Barmiah, E. et al. (2018). Development of thick superhydrophilic TiO_2-ZrO_2 transparent coatings realized through the inclusion of poly(methyl methacrylate) and Pluronic-F127. *ACS Omega*, 3(11), 14924–14932. https://doi.org/10.1021/acsomega.8b01940
72. Hassan, N. S., Jalil, A. A., Khusnun, N. F., Bahari, M. B., Hussain, I., Firmansyah, M. L. et al. (2023). Extra-modification of zirconium dioxide for potential photocatalytic applications towards environmental remediation: A critical review. *Journal of Environmental Management*, 327(1), Article 116869. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116869
73. Bouras, D., Fellah, M., Barille, R., Zerouali, M., Hambli, N., El-Hiti, G. A. (2025). Comparative study of zirconium-zinc oxide thin films on ceramic and glass substrates: Structural, optical, and photocatalytic properties. *Inorganic Chemistry Communications*, 171(1), Article 113561. https://doi.org/10.1016/j.inoche.2024.113561
74. Babatunde, E. O., Aderibigbe, F. A., Joseph, I. A., Are, C. T., Paul-Lasisi, J. O. (2022). Synthesis of zirconium oxide catalyst supported on carbonized material for the optimization of biodiesel from waste vegetable oil. *Southern Journal of Sciences*, 30(33), 18–27. https://doi.org/10.48141/SJS.v30.n33.2022.05_BABATUNDE_pgs_18_27.pdf
75. Andiyappan, K., Ramalingam, S. (2024). Intensification of bio-synthesis of zirconium oxide (ZrO_2) nanoparticles derived from novel *Crescentia cujete* fruits: Effects on diesel engine characteristics powered by waste engine oil methyl ester-diesel blend. *Chemical Engineering and Processing — Process Intensification*, 195(1), Article 109642. https://doi.org/10.1016/j.cep.2023.109642
76. Deshmane, V. G., Adewuyi, Y. G. (2012). Synthesis of thermally stable, high surface area, nanocrystalline mesoporous tetragonal zirconium dioxide (ZrO_2): Effects of different process parameters. *Microporous and Mesoporous Materials*, 148(1), 88–100. https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2011.07.012
77. Batista, R. V., Wanzeller, W. G., Lim, L.-T., Quast, E., Pinto, V. Z., de Menezes, V. M. (2022). Food packaging and its oxygen transfer models in active multilayer structures: A theoretical review. *Journal of Plastic Film & Sheeting*, 38(3), Article 875608792110704. http://dx.doi.org/10.1177/87560879211070465
78. Chęcińska, K., Chęciński, M., Sikora, M., Nowak, Z., Karwan, S., Chlubek, D. (2022). The effect of zirconium dioxide (ZrO_2) nanoparticles addition on the mechanical parameters of polymethyl methacrylate (PMMA): A systematic review and meta-analysis of experimental studies. *Polymers*, 14(5), Article 1047. https://doi.org/10.3390/polym14051047
79. Brossmann, U., Knoener, G., Schaefer, H.-E., Wuerschum, R. (2004). Oxygen diffusion in nanocrystalline ZrO_2. *ChemInform*, 35(42). https://doi.org/10.1002/chin.200442249
80. Fabris, S., Paxton, A. T., Finnis, M. W. (2002). A stabilization mechanism of zirconia based on oxygen vacancies only. *Acta Materialia*, 50(20), 5171–5178. https://doi.org/10.1016/S1359-6454(02)00385-3
81. Altaf, A. A., Badshaha, A., Khana, N., Ullah, S., Alia, S. (2011). Zirconium complexes in homogeneous ethylene polymerization. *Journal of Coordination Chemistry*, 64(10), 1815–1836. https://doi.org/10.1080/00958972.2011.568616
82. Alonso-Salinas, R., López-Miranda, S., Pérez-López, A. J., Acosta-Motos, J. R. (2024). Strategies to delay ethylene-mediated ripening in climacteric fruits: Implications for shelf life extension and postharvest quality. *Horticulturae*, 10(8), Article 840. https://doi.org/10.3390/horticulturae10080840
83. Mope, C., Adegoroye, A., Oluwalade, T. A., Adeyelu, A. A. (2024). Ethylene management in fresh produce transport. *Asian Journal of Food Research and Nutrition*, 3(1), 60–71.
84. Hussain, M. B., Ahmad, M., Cheng, X., Mehmood, R., Ajmal, Z., Hussain, S. et al. (2025). ZrO_2 supported Pt nanoparticles for robust electrocatalytic hydrogen evolution reactions. *International Journal of Hydrogen Energy*, 106(1), 825–833. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.02.024
85. Alfei, S., Schito, G. C., Schito, A. M., Zuccari, G. (2024). Reactive oxygen species (ROS)-mediated antibacterial oxidative therapies: Available methods to generate ROS and a novel option proposal. *International Journal of Molecular Sciences*, 25(13), Article 7182. https://doi.org/10.3390/ijms25137182
86. Shi, L. -E., Li, Z. -H., Zheng, W., Zhao, Y.- F., Jin, Y. -F., Tang, Z. -X. (2014). Synthesis, antibacterial activity, antibacterial mechanism and food applications of ZnO nanoparticles: A review. *Food Additives and Contaminants: Part A*, 31(2), 173–186. https://doi.org/10.1080/19440049.2013.865147
87. Wrońska, N., Katir, N., Miłowska, K., Hammi, N., Nowak, M., Kędzierska, M. et al. (2021). Antimicrobial effect of chitosan films on food spoilage bacteria. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(11), Article 5839. https://doi.org/10.3390/ijms22115839
88. Domínguez, R., Pateiro, M., Gagaoua, M., Barba, F. J., Zhang, W., Lorenzo, J. M. (2019). A comprehensive review on lipid oxidation in meat and meat products. *Antioxidants*, 8(10), Article 429. https://doi.org/10.3390/antiox8100429
89. Gotoh, N., Wada, S. (2006). The importance of peroxide value in assessing food quality and food safety. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 83(5), 473–474. https://doi.org/10.1007/s11746-006-1229-4
90. Mikus, M., Galus, S. (2025). Extending the shelf life of apples after harvest using edible coatings as active packaging — A review. *Applied Sciences*, 15(2), Article
91. Hussien, Z. Y., Moften, A. Q., Abdulrehman, M. A. (2025). Review of zirconia (ZrO_2) biomedical applications: Advanced manufacturing techniques and materials properties. *Revue des Composites et des Matériaux Avancés — Journal of Composite and Advanced Materials*, 35(2), 345–353. https://doi.org/10.18280/rcma.350216
92. Özkan, Z., Çakır, B., Avşar, S. G., Olçay, E., Gökmen, U. (2024). Effect of ZrO_2 on radiation permeability properties of polypropylene. *Gazi University Journal of Science Part A: Engineering and Innovation*, 11(2), 407–418. https://doi.org/10.54287/gujsa.1475116
93. Stanicka, K., Dobrucka, R., Woźniak, M., Sip, A., Majka, J., Kozak, W. et al. (2021). The effect of chitosan type on biological and physicochemical properties of films with propolis extract. *Polymers*, 13(22), Article 3888. https://doi.org/10.3390/polym13223888
94. Dirpan, A., Hidayat, S. H. (2023). Quality and shelf-life evaluation of fresh beef stored in smart packaging. *Foods*, 12(2), Article 396. https://doi.org/10.3390/foods12020396
95. Asiltürk, M., Burunkaya, E., Sayılkan, F., Kiraz, N., Arpaç, E. (2011). Structural and optical properties of thin films prepared from surface modified ZrO_2. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 357(1), 206–210. https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2010.09.034
96. Chandrababu, V., Parameswaranpillai, J., Gopi, J. A., Pathak, C., Dominic, C. D. M., Feng, N. L. et al. (2024). Progress in food packaging applications of biopolymer-nanometal composites — A comprehensive review. *Biomaterials Advances*, 162(1), Article 213921. https://doi.org/10.1016/j.bioadv.2024.213921
97. Valdez-Salas, B., Salvador-Carlos, J., Beltrán-Partida, E. A., Castillo-Sáenz, J., Chairez-González, J., Curiel-Álvarez, M. (2025). Zirconium nanostructures obtained from anodic synthesis by-products and their potential use in PVA-based coatings. *Ceramics*, 8(2), Article 74. https://doi.org/10.3390/ceramics8020074
98. Nisha, U. M., Venkatesh, D., Vasanthan, S., Rajeswaran, P., Balaji, J., Karthik, P. S. (2025). Interfacial coupling effects of chitosan integrated ZrO_2/Bi_2O_3/CeO_2 quaternary composite for efficient wastewater treatment and antimicrobial activity. *Ionics*, 31(1), 2739–2756. http://doi.org/10.1007/s11581-025-06095-6
99. Sundar, N., Srinivasan, A. K., Keerthana, P., Jayakaran, J. S. S., Govindaraj, A. K. (2021). Schiff's base (SB) modified zirconium dioxide reinforced PLA bio-composite film for industrial packaging applications. *Composites Communications*, 25(1), Article 100750. https://doi.org/10.1016/j.coco.2021.100750
100. Amin, F., Moin, S. F., Kumar, N., Asghar, M. A., Mahmood, S. J., Palma, P. J. (2025). The impact of zirconium oxide nanoparticles on the mechanical and physical properties of glass ionomer dental materials. *International Journal of Molecular Sciences*, 26(11), Article 5382. https://doi.org/10.3390/ijms26115382
101. Yan, Y., Ma, Z., Sun, J., Bu, M., Huo, Y., Wang, Z. et al. (2021). Surface microstructure-controlled ZrO_2 for highly sensitive room-temperature NO_2 sensors. *Nano Materials Science*, 3(3), 268–275. https://doi.org/10.1016/j.nanoms.2021.02.001
102. Khairy, Y., Abdel-Aziz, M. M., Algarni, H., Alshehri, A. M., Yahia, I. S., Ali, H. E. (2019). The optical characteristic of PVA composite films doped by ZrO_2 for optoelectronic and block UV–Visible applications. Materials Research Express, 6(10), Article 115346. https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab4e34
103. D'Almeida, A. P., de Albuquerque, T. L. (2024). Innovations in food packaging: From bio-based materials to smart packaging systems. *Processes*, 12(10), Article 2085. https://doi.org/10.3390/pr12102085
104. Nabiyev, A. A., Olejniczak, A., Islamov, A. Kh., Pawlukojc, A., Ivankov, O. I., Balasoiu, M. et al. (2021). Composite films of HDPE with SiO_2 and ZrO_2 nanoparticles: The structure and interfacial effects. *Nanomaterials*, 11(10), Article 2673. https://doi.org/10.3390/nano11102673
105. Shao, L., Xi, Y., Weng, Y. (2022). Recent advances in PLA-based antibacterial food packaging and its applications. *Molecules*, 27(18), Article 5953. https://doi.org/10.3390/molecules27185953

106. Qu, T., Wang, X., Zhang, F. (2025). Antibacterial food packaging with chitosan and cellulose blends for food preservation. *Polymers*, 17(13), Article 1850. https://doi.org/10.3390/polym17131850
107. Qu, X., Hu, Y., Xu, C., Li, Y., Zhang, L., Huang, Q. et al. (2024). Optical sensors of volatile organic compounds for non-invasive diagnosis of diseases. *Chemical Engineering Journal*, 485(1), Article 149804. https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.149804
108. Nguyen, L. B. T., Truc, N. T. T., Nguyen, N. T. T., Vu, D. K., Lee, B. -K. (2023). A regional approach for health risk assessment of toxicants in plastic food containers. Toxicological Research, 39(4), 681–692. https://doi.org/10.1007/s43188-023-00194-0
109. Garanin, Y., Shakirzyanov, R., Borgekov, D., Kozlovskiy, A., Volodina, N., Shlimas, D. et al. (2024). Study of morphology, phase composition, optical properties, and thermal stability of hydrothermal zirconium dioxide synthesized at low temperatures. *Scientific Reports*, 14(1), Article 29398. https://doi.org/10.1038/s41598-024-80399-x
110. Kroll, A., Dierker, C., Rommel, C., Hahn, D., Wohlleben, W., Schulze-Isfort, C. et al. (2011). Cytotoxicity screening of 23 engineered nanomaterials using a test matrix of ten cell lines and three different assays. *Particle and Fibre Toxicology*, 8(1), Article 9. https://doi.org/10.1186/1743-8977-8-9
111. Zhang, X. Q., Yin, L. H., Tang, M., Pu, Y. P. (2011). ZnO, TiO_2, SiO_2, and Al_2O_3 nanoparticles-induced toxic effects on human fetal lung fibroblasts. *Biomedical and Environmental Sciences*, 24(6), 661–669. https://doi.org/10.3967/0895-3988.2011.06.011
112. Aati, S., Shrestha, B., Fawzy, A. (2022). Cytotoxicity and antimicrobial efficiency of ZrO_2 nanoparticles reinforced 3D printed resins. *Dental Materials*, 38(8), 1432–1442. https://doi.org/10.1016/j.dental.2022.06.030
113. Seref, N., Cufaoglu, G. (2025). Food packaging and chemical migration: A food safety perspective. *Journal of Food Science*, 90(5), Article e70265. https://doi.org/10.1111/1750-3841.70265
114. Hu, X., Lu, C., Tang, H., Pouri, H., Joulin, E., Zhang, J. (2023). Active food packaging made of biopolymer-based composites. *Materials*, 16(1), Article 279. https://doi.org/10.3390/ma16010279
115. Mafe, A. N., Edo, G. I., Makia, R. S., Joshua, O. A., Akpoghelie, P. O., Gaaz, T. S. et al. (2024). A review on food spoilage mechanisms, food borne diseases and commercial aspects of food preservation and processing. *Food Chemistry Advances*, 5(1), Article 100852. https://doi.org/10.1016/j.focha.2024.100852
116. Lee, Y.-Y., Li, I.-C., Kogularasu, S., Huang, B.-W., Wang, Y.-F., Masimukku, S. et al. (2025). Advanced oxide-stabilized zirconia ceramics for flue gas filtration in air purification systems. *Journal of Hazardous Materials Advances*, 17(1), Article 100539. https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2024.100539
117. Vaiani, L., Boccaccio, A., Uva, A. E., Palumbo, G., Piccininni, A., Guglielmi, P. et al. (2023). Ceramic materials for biomedical applications: An overview on properties and fabrication processes. *Journal of Functional Biomaterials*, 14(3), Article 146. https://doi.org/10.3390/jfb14030146
118. Wang, B. A., Wang, N., Yang, Y. J., Zhong, H., Ma, M. Z., Zhang, X. Y. et al. (2017). Microstructure and mechanical properties of ZrO_2 particle dispersion strengthened 16MnV steel. *Materials Science and Engineering: A*, 692(1), 168–173. https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.03.072
119. Petousis, M., Moutsopoulou, A., Korlos, A., Papadakis, V., Mountakis, N., Tsikritzis, D. et al. (2023). The effect of nano zirconium dioxide (ZrO_2)-optimized content in polyamide 12 (PA12) and polylactic acid (PLA) matrices on their thermomechanical response in 3D printing. *Nanomaterials*, 13(13), Article 1906. https://doi.org/10.3390/nano13131906
120. Ragaert, K., Delva, L., Van Geem, K. (2017). Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste. *Waste Management*, 69(1), 24–58. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.07.044
121. European Commission. (2025). Food contact materials. Retrieved from https://food.ec.europa.eu/food-safety/chemical-safety/food-contact-materials_en Accessed September 26, 2025
122. European Commission. (2011). Commission Regulation (EU) No. 10/2011 of 14 January 2011 on plastic materials and articles intended to come into contact with food. Retrieved from https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2011/10/oj/eng Accessed September 26, 2025
123. U. S. Food and Drug Administration. (2023). Generally recognized as safe (GRAS). Retrieved from https://www.fda.gov/food/food-ingredients-packaging/generally-recognized-safe-gras Accessed September 26, 2025
124. U. S. Code of Federal Regulations. (n.d.). 21 CFR Part 177: Indirect food additives: Polymers. Retrieved from https://www.ecfr.gov/current/title-21/chapter-I/subchapter-B/part-177 Accessed September 26, 2025
125. FAO/WHO. (2011). Evaluation of certain food additives and contaminants: Seventy-fourth report of the Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives (JECFA). WHO Technical Report Series, No. 966. Geneva: World Health Organization. Retrieved from https://www.who.int/publications/i/item/9789241209665 Accessed September 26, 2025
126. Karunakaran, G., Suriyaprabha, R., Manivasakan, P., Yuvakkumar, R., Rajendran, V., Kannan, N. (2013). Impact of nano and bulk ZrO_2, TiO_2 particles on soil nutrient contents and PGPR. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 13(1), 678–685. https://doi.org/10.1166/jnn.2013.6880
127. Ncube, L. K., Ude, A. U., Ogunmuyiwa, E. N., Zulkifli, R., Beas, I. N. (2020). Environmental impact of food packaging materials: A review of contemporary development from conventional plastics to polylactic acid based materials. *Materials*, 13(21), Article 4994. https://doi.org/10.3390/ma13214994
128. Xu, L., Xiao, Y., van Sandwijk, A., Xu, Q., Yang, Y. (2015). Production of nuclear grade zirconium: A review. *Journal of Nuclear Materials*, 466(1), 21–28. https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2015.07.010
129. Ray, P. C., Yu, H., Fu, P. P. (2009). Toxicity and environmental risks of nanomaterials: Challenges and future needs. *Journal of Environmental Science and Health, Part C: Environmental Carcinogenesis and Ecotoxicology Reviews*, 27(1), 1–35. https://doi.org/10.1080/10590500802708267
130. Drishya, P. K., Reddy, M. V., Mohanakrishna, G., Sarkar, O., Isha, Rohit, M. V. et al. (2025). Advances in microbial and plant-based biopolymers: Synthesis and applications in next-generation materials. *Macromol*, 5(2), Article 21. https://doi.org/10.3390/macromol5020021
131. Saad, S. M., Hadi, E. M., Hussein, N. N., Al-Kuraishy, H. M., Akhtar, M. F., Jabir, M. S. et al. (2026). Enhanced antibacterial activities of zirconia nanoparticles modified with yttrium oxide and alumina. *Scientific Reports*, 16(1), Article 14711. https://doi.org/10.1038/s41598-025-29085-0
132. Zhang, M. Q., Rong, M. Z., Yu, S. L., Wetzel, B., Friedrich, K. (2002). Effect of particle surface treatment on the tribological performance of epoxy based nanocomposites. *Wear*, 253(9–10), 1086–1093. https://doi.org/10.1016/S0043-1648(02)00252-1
133. Pires, A. F., Díaz, O., Cobos, A., Pereira, C. D. (2024). A review of recent developments in edible films and coatings — Focus on whey-based materials. *Foods*, 13(16), Article 2638. https://doi.org/10.3390/foods13162638
134. Davar, F., Shayan, N., Hojjati-Najafabadi, A., Sabaghi, V., Hasani, S. (2017). Development of ZrO_2-MgO nanocomposite powders by the modified sol-gel method. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 14(2), 211–219. http://doi.org/10.1111/ijac.12624
135. European Food Safety Authority (EFSA). (2021). Guidance on risk assessment of nanomaterials to be applied in the food and feed chain: Human and animal health. *EFSA Journal*, 19(8), Article e06768. https://doi.org/10.2903/j.efsa.2021.6768
136. U. S. Food and Drug Administration (FDA). (2014). Guidance for industry: Assessing the effects of significant manufacturing process changes, including emerging technologies, on the safety and regulatory status of food ingredients and food contact substances, including food ingredients that are color additives. Silver Spring, MD: U.S. FDA. Retrieved from https://www.fda.gov/regulatory-information/search-fda-guidance-documents Accessed September 26, 2025
137. Lin, C., Huang, X., Xue, Y., Jiang, S., Chen, C., Liu, Y. et al. (2025). Advances in medical devices using nanomaterials and nanotechnology: Innovation and regulatory science. *Bioactive Materials*, 48(1), 353–369. https://doi.org/10.1016/j.bioactmat.2025.02.017
138. Cheng, J., Gao, R., Zhu, Y., Lin, Q. (2024). Applications of biodegradable materials in food packaging: A review. *Alexandria Engineering Journal*, 91(1), 70–83. https://doi.org/10.1016/j.aej.2024.01.080
139. Olaniyan, O. F., Ariwaodo, C. A., Ibrahim, S. O., Atolani, O., Kambizi, L. (2025). Advances in green synthesis and application of nanoparticles from crop residues: A comprehensive review. *Scientific African*, 28(1), Article e02654. https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2025.e02654
140. Han, K., Yang, H., Fan, D., Deng, J. (2025). Advances in nanotechnology research in food production, nutrition, and health. *Nutrients*, 17(15), Article 2443. https://doi.org/10.3390/nu17152443

AUTHOR INFORMATION	СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ
Affiliation	**Принадлежность к организации**
Bima P. Pratama — Ph.D., Dr., Researcher, Research Center for Process Technology, National Research and Innovation Agency (BRIN), Jl. Raya Serpong, South Tangerang, West Java, 15310, Indonesia E-mail: bimaputra.pratama@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3068-8718	**Бима П. Пратама** — Ph.D., научный сотрудник, Исследовательский центр технологических процессов, Национальное агентство исследований и инноваций (BRIN), Jl. Рая Серпонг, Южный Тангеранг, Западная Ява, 15310, Индонезия E-mail: bimaputra.pratama@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3068-8718
Aswin R. Khairullah — Ph.D., Dr., Researcher, Research Center for Veterinary Science, National Research and Innovation Agency (BRIN), Jl. Raya Bogor Km. 46 Cibinong, Bogor, West Java, 16911, Indonesia E-mail: aswinrafif@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9421-9342	**Асвин Р. Хайрулла** — Ph.D., научный сотрудник, Исследовательский центр ветеринарных наук, Национальное агентство исследований и инноваций (BRIN), Jl. Рая Богор Км. 46 Cibinong, Богор, Западная Ява, 16911, Индонезия E-mail: aswinrafif@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9421-9342
Wita Yulianti — Ph.D., Dr., Researcher, Research Center for Biota Systems, National Research and Innovation Agency (BRIN), Jl. Raya Bogor Km. 46 Cibinong, Bogor, West Java, 16911, Indonesia E-mail: witaunand@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0009-0001-8138-8021	**Вита Юлианти** — Ph.D., научный сотрудник, Исследовательский центр биотных систем, Национальное агентство исследований и инноваций (BRIN), Jl. Рая Богор Км. 46 Cibinong, Богор, Западная Ява, 16911, Индонезия E-mail: witaunand@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0009-0001-8138-8021

AUTHOR INFORMATION	СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ
Affiliation	**Принадлежность к организации**
Imam Mustofa — Ph.D., Prof., Professor, Faculty of Veterinary Medicine, Division of Veterinary Reproduction Universitas Airlangga, Kampus C Mulyorejo, Jl. Dr. Ir. H. Soekarno, Surabaya, East Java, 60115, Indonesia Tel.: +62 812–3561–540 E-mail: imam.mustofa@fkh.unair.ac.id ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4543-1659	**Имам Мустофа** — Ph.D., Профессор, Профессор, Факультет ветеринарной медицины, Отдел ветеринарной репродукции, Университет Аирлангга, Кампус С Мульорехо, Jl. Доктор Ир. Х. Сукарно, Сурабая, Восточная Ява, 60115, Индонезия Тел.: +62 812–3561–540 E-mail: imam.mustofa@fkh.unair.ac.id ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4543-1659
Riza Z. Ahmad — Ph.D., Dr., Researcher, Research Center for Veterinary Science, National Research and Innovation Agency (BRIN), Jl. Raya Bogor Km. 46 Cibinong, Bogor, West Java, 16911, Indonesia E-mail: riza011@brin.go.id ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2067-717X	**Риза З. Ахмад** — Ph.D., научный сотрудник, Исследовательский центр ветеринарных наук, Национальное агентство исследований и инноваций (BRIN), Jl. Рая Богор Км. 46 Cibinong, Богор, Западная Ява, 16911, Индонезия E-mail: riza011@brin.go.id ОРЦИД: https://orcid.org/0000–0002–2067–717X
Lulum Leliana — Ph.D., Dr., Associate Professor, Faculty of Agricultural Technology, Department of Food and Agricultural Product Technology, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, 55281, Indonesia E-mail: lulum.leliana@ugm.ac.id ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0700-7198	**Лулум Лелиана** — Ph.D., Адъюнкт-профессор, Факультет сельскохозяйственных технологий, Кафедра технологий пищевых продуктов и сельскохозяйственной продукции, Университет Гаджа Мада, Джокьякарта, 55281, Индонезия E-mail: lulum.leliana@ugm.ac.id ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0700-7198
Mohammad Sukmanadi — Ph.D., Dr., Associate Professor, Faculty of Veterinary Medicine, Division of Basic Veterinary Medicine, Universitas Airlangga, Kampus C Mulyorejo, Jl. Dr. Ir. H. Soekarno, Surabaya, East Java, 60115, Indonesia E-mail: moh-s@fkh.unair.ac.id ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7697-3667	**Мохаммад Сукманади** — Ph.D., Адъюнкт-профессор, Факультет ветеринарной медицины, Отделение фундаментальной ветеринарной медицины, Университет Аирлангга, Кампус С Мульорехо, Jl. Доктор Ир. Х. Сукарно, Сурабая, Восточная Ява, 60115, Индонезия E-mail: moh-s@fkh.unair.ac.id ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7697-3667
Nabila R. 'Afifah — Bachelor, S.T., Graduated, Faculty of Engineering, Department of Chemical Engineering, University of Lampung, Bandar Lampung City, Lampung, 35142, Indonesia E-mail: nabilarizqi.afifah@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0009-0008-0844-266X	**Набила Р. Афифа** — бакалавр, СТ, выпускник, Инженерный факультет, Кафедра химической инженерии, Университет Лампунг, Бандар-Лампунг, Лампунг, 35142, Индонезия E-mail: nabilarizqi.afifah@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0009-0008-0844-266X
Fadhila Utari — Ph.D., Dr., Researcher, Research Center for Pharmaceutical Ingredients and Traditional Medicine, National Research and Innovation Agency (BRIN), Jl. Raya Bogor Km. 46 Cibinong, Bogor, West Java, 16911, Indonesia E-mail: utari.fadhila@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0009-0008-0218-919X	**Фадхила Утари** — Ph.D., научный сотрудник, Исследовательский центр фармацевтических ингредиентов и традиционной медицины, Национальное агентство исследований и инноваций (BRIN), Jl. Рая Богор Км. 46 Cibinong, Богор, Западная Ява, 16911, Индонезия E-mail: utari.fadhila@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0009-0008-0218-919X
Adeyinka O. Akintunde — Ph.D., Dr., Associate Professor, Department of Agriculture and Industrial Technology, Babcock University, Ilishan-Remo 121103, Ogun State, Nigeria E-mail: adeyinka.akintunde@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6013-0902	**Адейинка О. Акинтунде** — Ph.D., Адъюнкт-профессор, Кафедра сельского хозяйства и промышленных технологий, Университет Бабкока, Илишан-Ремо 121103, штат Огун, Нигерия E-mail: adeyinka.akintunde@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6013-0902
Fidela D. Agrippina — Master, M.T.P., Food Analyst, Center for Standardization and Industrial Services (BSPJI) Bandar Lampung, Ministry of Industry, Bandar Lampung City, Lampung, 35142, Indonesia E-mail: fidela.devina.agrippina@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0009-0001-0422-2845	**Фидела Д. Агриппина** — магистр, МТР, аналитик по пищевым продуктам, Центр стандартизации и промышленных услуг (BSPJI), Бандар Лампунг, Министерство промышленности, Бандар Лампунг, Лампунг, 35142, Индонезия E-mail: fidela.devina.agrippina@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0009-0001-0422-2845
Muhammad R. F. Hidayat — Master, M.T., Graduated, Master Program of Industrial Engineering, Faculty of Industrial Technology and Systems Engineering, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Jl. Teknik Kimia, Keputih, Surabaya, East Java, 60111, Indonesia E-mail: rifqifahmi3104@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0009-0005-4319-7776	**Мухаммад Р. Ф. Хидаят** — Master, M.T.P., выпускник магистерской программа промышленного инжиниринга, Факультет промышленных технологий и системной инженерии, Технологический институт Сепулух Ноябрь, Jl. Teknik Kimia, Кепутих, Сурабая, Восточная Ява, 60111, Индонезия E-mail: rifqifahmi3104@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0009-0005-4319-7776
Bantari W. K. Wardhani — Ph.D., Dr., Researcher, Research Center for Pharmaceutical Ingredients and Traditional Medicine, National Research and Innovation Agency (BRIN), Jl. Raya Bogor Km. 46 Cibinong, Bogor, West Java, 16911, Indonesia E-mail: bantariwisynu@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7376-6187	**Бантари В. К. Вардхани** — Ph.D., научный сотрудник, Исследовательский центр фармацевтических ингредиентов и традиционной медицины, Национальное агентство исследований и инноваций (BRIN), Jl. Рая Богор Км. 46 Cibinong, Богор, Западная Ява, 16911, Индонезия E-mail: Bantariwisynu@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7376-6187
Ikechukwu B. Moses — Ph.D., Dr., Associate Professor, Department of Applied Microbiology, Faculty of Science, Ebonyi State University, Abakaliki, 480211, Nigeria E-mail: ikechukwumoses937@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5928-8198	**Икечукву Б. Мозес** — Ph.D., Адъюнкт-профессор, Кафедра прикладной микробиологии, Факультет естественных наук, Государственный университет Эбони, Абакалики, 480211, Нигерия E-mail: ikechukwumoses937@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5928-8198
Dea A. A. Kurniasih — Ph.D., Dr., Researcher, Research Center for Public Health and Nutrition, National Research and Innovation Agency (BRIN), Jl. Raya Bogor Km. 46 Cibinong, Bogor, West Java, 16911, Indonesia E-mail: deaariani@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6159-0652	**Деа А. А. Курниасих** — Ph.D., научный сотрудник, Исследовательский центр общественного здравоохранения и питания, Национальное агентство исследований и инноваций (BRIN), Jl. Рая Богор Км. 46 Cibinong, Богор, Западная Ява, 16911, Индонезия E-mail: deaariani@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6159-0652
Arif N. M. Ansori — Ph.D., Dr., Assistant Professor, Postgraduate School, Universitas Airlangga, Kampus B Dharmawangsa, East Java, 60286, Indonesia; Uttaranchal Institute of Pharmaceutical Sciences, Uttaranchal University, Uttarakhand, 248007, India; Medical Biotechnology Research Group, Virtual Research Center for Bioinformatics and Biotechnology, East Java, 60493, Indonesia E-mail: ansori.anm@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1279-3904	**Ариф Н. М. Ансори** — Ph.D., доктор наук, Адъюнкт-профессор, отдел аспирантуры, Университет Айрлангга, кампус Б Дхармавангса Восточная Ява, 60286, Индонезия; Институт фармацевтических наук Уттаранчала, Университет Уттаранчала, Уттаранчал, 248007, Индия; Группа исследований медицинской биотехнологии, Виртуальный исследовательский центр биоинформатики и биотехнологии, Восточная Ява, 60493, Индонезия E-mail: ansori.anm@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1279-3904
Contribution	**Критерии авторства**
Authors equally relevant to the writing of the manuscript, and equally responsible for plagiarism.	Авторы в равных долях имеют отношение к написанию рукописи и одинаково несут ответственность за плагиат.
Conflict of interest	**Конфликт интересов**
The authors declare that there is no conflict of interest.	Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

DOI: https://doi.org/10.21323/2618-9771-2026-9-2-282-293

Поступила 28.10.2025
Поступила после рецензирования 04.06.2026
Принята в печать 09.06.2026
© Кузнецов М. А., Никитин И. А., 2026

https://www.fsjour.com/jour
Научная статья
Открытый доступ

ХЕМОИНФОРМАТИЧЕСКАЯ ПРИОРИТИЗАЦИЯ БИОАКТИВНЫХ СОЕДИНЕНИЙ, АССОЦИИРОВАННЫХ С ХЛЕБНОЙ МАТРИЦЕЙ НА ОСНОВЕ ФАРМАКОЛОГИЧЕСКИХ АННОТАЦИЙ CHEMBL И МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Кузнецов М. А., Никитин И. А.*

Российский экономический университет имени Г. В. Плеханова, Москва, Россия

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:
хлебная матрица; хемоинформатика; ChEMBL; RDKit; фенольные кислоты; случайный лес; молекулярные дескрипторы; внутренняя проверка; приоритизация соединений

АННОТАЦИЯ

Хлеб и продукты на основе зернового сырья являются не только источником макронутриентов, но и сложной пищевой матрицей, содержащей низкомолекулярные соединения фенольной, ароматической и ферментационной природы. Для ряда таких соединений в экспериментальных и фармакологических базах описаны антиоксидантные, противовоспалительные, противогрибковые и рецепторно-опосредованные эффекты. При этом такие сведения относятся преимущественно к тест-системам для индивидуальных веществ и не доказывают проявление соответствующих эффектов непосредственно в составе хлеба. Целью работы была разработка воспроизводимой хемоинформатической схемы внутренней приоритизации соединений, ассоциированных с хлебной и зерновой матрицей, на основе структурных признаков и фармакологических аннотаций ChEMBL. В анализ включили 43 куративно обработанных соединения. После стандартизации структур и удаления дубликатов по InChIKey для каждой молекулы рассчитали 2058 признаков, включающих физико-химические дескрипторы и топологические фингерпринты. Функциональные метки формировали по данным ChEMBL для четырёх направлений активности: антиоксидантной, противовоспалительной, противогрибковой и AhR-модулирующей. Модели логистической регрессии, случайного леса, CatBoost и XGBoost сравнивали во вложенной повторной перекрёстной проверке в многометочной постановке; независимый внешний набор данных в настоящей работе не использовали. Наилучшее сочетание качества и устойчивости показал случайный лес: усреднённая точность ранжирования положительных примеров составила 0,8041 при 95 % доверительном интервале 0,7766–0,8320, ROC-AUC — 0,8056. Наиболее устойчивым оказался противовоспалительный класс, тогда как антиоксидантный характеризовался большей неоднородностью. Верхние позиции ранжирования заняли протокатеховая, кофейная, галловая и феруловая кислоты, кверцетин и (+)-катехин. Проверка при разделении соединений по молекулярным каркасам снизила усреднённую точность до 0,6245, что указывает на ограниченную переносимость модели. Полученные результаты следует рассматривать как инструмент предварительного отбора соединений для последующей внешней и экспериментальной проверки, а не как подтверждение их функционального действия в хлебной матрице.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Исследование выполнено за счет средств субсидии на выполнение государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках научно-исследовательского проекта № FSSW-2025-0004.

Received 28.10.2025
Accepted in revised 04.06.2026
Accepted for publication 09.06.2026
© Kuznetsov M. A., Nikitin I. A., 2026

Available online at https://www.fsjour.com/jour
Original scientific article
Open access

CHEMOINFORMATIC PRIORITIZATION OF BIOACTIVE COMPOUNDS ASSOCIATED WITH THE BREAD MATRIX BASED ON CHEMBL PHARMACOLOGICAL ANNOTATIONS AND MACHINE LEARNING

Maksim A. Kuznetsov, Igor A. Nikitin*

Plekhanov Russian University of Economics, Moscow, Russia

KEYWORDS:
bread matrix; chemoinformatics; ChEMBL; RDKit; phenolic acids; random forest; molecular descriptors; internal validation; compound prioritization

ABSTRACT

Bread and cereal-based products represent not only a source of macronutrients but also a complex food matrix containing low-molecular-weight phenolic, aromatic and fermentation-derived compounds. A number of these molecules have been associated with antioxidant, anti-inflammatory, antifungal and receptor-mediated effects in experimental studies and pharmacological databases. However, these records mainly describe test systems for individual compounds and do not demonstrate the corresponding effects directly in bread products. The objective was to develop a reproducible chemoinformatics framework for internal prioritization of compounds associated with bread and cereal matrices based on structural features and ChEMBL pharmacological annotations. The study included 43 curated compounds. After structural standardization and InChIKey deduplication, 2,058 molecular features were calculated, including physicochemical descriptors and topological fingerprints. Functional labels were generated from ChEMBL records for four activity classes: antioxidant, anti-inflammatory, antifungal, and AhR-modulating. Logistic regression, random forest, CatBoost, and XGBoost were compared using nested repeated multilabel cross-validation; no independent external dataset was used in this study. Random forest showed the best balance of performance and robustness, with a macro average precision of 0.8041 (95 % CI: 0.7766–0.8320) and a macro ROC-AUC of 0.8056. The anti-inflammatory class showed the most stable performance, whereas the antioxidant class was more heterogeneous. The highest-ranking compounds were protocatechuic, caffeic, gallic and ferulic acids, quercetin, and (+)-catechin. Evaluation with molecular scaffold-based splitting reduced macro average precision to 0.6245, indicating limited

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: **Кузнецов, М. А., Никитин, И. А.** (2026). Хемоинформатическая приоритизация биоактивных соединений, ассоциированных с хлебной матрицей на основе фармакологических аннотаций ChEMBL и машинного обучения. *Пищевые системы*, 9(2), 282–293. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2026-9-2-282-293

FOR CITATION: **Kuznetsov, M. A., Nikitin, I. A.** (2026). Chemoinformatic prioritization of bioactive compounds associated with the bread matrix based on ChEMBL pharmacological annotations and machine learning. *Food Systems*, 9(2), 282–293. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2026-9-2-282-293

transferability to structurally distant compounds. The proposed approach should be regarded as a tool for preliminary candidate selection for further external and biological validation, rather than as experimental confirmation of their functional effects in the bread matrix.

FUNDING: This study was funded by a subsidy for the implementation of a state assignment from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of research project No. FSSW-2025-0004.

1. Введение

Хлеб и продукты на основе зернового сырья традиционно рассматриваются как один из базовых компонентов рациона человека, определяющих поступление углеводов, белков, пищевых волокон, минеральных веществ и ряда микронутриентов. Вместе с тем хлебная матрица представляет собой сложную многокомпонентную систему, в которой присутствуют низкомолекулярные соединения с потенциальной биологической активностью. Показано, что содержание феруловой кислоты и других фенольных кислот изменяется на разных этапах перехода от зерна к готовому хлебу, а также зависит от вида зернового сырья, типа ферментации и условий выпечки [1–4]. Отдельные исследования указывают, что использование алейроновых и цельнозерновых фракций влияет не только на содержание фенольных кислот, но и на их доступность в пищевой матрице [5].

Помимо фенольных кислот, хлеб и связанные с ним ингредиенты содержат ароматические альдегиды и спирты, летучие продукты термических превращений, а также метаболиты дрожжевой и молочнокислой ферментации. Ванилин рассматривается как ароматическое соединение с описанным терапевтическим потенциалом [6]. Работы, посвящённые закваскам, бобово-зерновым матрицам и летучему профилю хлеба, показывают, что ферментационные процессы способны существенно изменять химический состав и сенсорные свойства готового продукта [7–10].

Наиболее изученной группой биоактивных компонентов зернового и хлебного происхождения остаются фенольные соединения. Для кверцетина, апигенина, кемпферола и некоторых производных нарингина описаны противовоспалительные, антимикробные и связанные с кишечной микробиотой эффекты [11–15]. Для фенольных кислот зернового происхождения установлены изменения профиля и антиоксидантной активности в процессе хлебопечения, а добавление фенольных соединений в хлеб может сопровождаться как антиоксидантными преимуществами, так и изменением структуры и сенсорных характеристик продукта [16–18]. Отдельно показано, что феруловая кислота способна проявлять противовоспалительные эффекты через регуляцию аутофагии и блокирование активации NLRP3-инфламмасомы [19].

Значительный интерес представляет также возможная связь пищевых флавоноидов и продуктов микробной трансформации с модуляцией арилуглеводородного рецептора (AhR), участвующего в регуляции барьерной функции кишечного эпителия, иммунного ответа и взаимодействия организма с микробными метаболитами. Для ряда флавоноидов показана способность выступать агонистами или антагонистами AhR, причём характер эффекта зависит как от структуры соединения, так и от клеточного контекста [20–22].

Хемоинформатика и методы машинного обучения позволяют перейти от разрозненных описательных сведений к формализованной оценке структурно-биологических закономерностей. Использование базы ChEMBL обосновано тем, что она объединяет вручную курированные сведения о химических структурах, биологических активностях и типах измерений, применимых для построения прогнозных моделей [23]. Топологические молекулярные фингерпринты служат одним из распространённых способов представления структуры малых молекул в таких задачах [24]. Вместе с тем крупномасштабные сравнения алгоритмов на данных ChEMBL показывают, что качество прогнозов зависит не только от сложности модели, но и от схемы валидации, а повторное использование тех же данных при подборе параметров способно завышать оценку качества [25,26].

Следует отметить, что применение машинного обучения для прогнозной оценки пищевых и природных низкомолекулярных соединений уже имеет ряд методических прецедентов, хотя они решают иные задачи. Так, инструмент PhyteByte использовал фармакологические данные ChEMBL и сведения о пищевом составе для поиска продуктов, содержащих соединения с прогнозируемыми целевыми биологическими свойствами [27]. Reker et al. применили машинное обучение для выявления ранее неочевидных биологических эффектов пищевых и вспомогательных соединений, включая взаимодействия с белками, влияющими на фармакокинетику [28]. В работе Sanchez-Ruiz и Colmenarejo химическое пространство пищевых соединений сопоставлялось с белковыми мишенями человека на основе FooDB и ChEMBL, что позволило выявлять пробелы в хемобиологической аннотации и прогнозировать потенциальные мишени [29]. Для природных соединений также показана возможность оценки функционального сходства с лекарственными молекулами по структурным признакам и известным белковым мишеням [30]. Ранее авторами настоящей работы были разработаны близкие по логике, но предметно и методически отличающиеся алгоритмы: модель прогнозирования активности пищевых и микробных метаболитов в отношении ERα [31] и *in silico*-пайплайн мультитаргетного скрининга флавоноидных нутрицевтических кандидатов при MASLD [32]. В отличие от перечисленных исследований, настоящая работа фокусируется не на универсальном поиске мишеней или одной рецепторной системе, а на матрично-ориентированной приоритизации соединений, ассоциированных с хлебной матрицей по нескольким функциональным классам.

В этой связи применение машинного обучения к соединениям хлебной матрицы должно строиться не как попытка получить окончательное доказательство их биологического действия, а как инструмент вычислительной приоритизации. Его задача состоит в том, чтобы на основе доступных структурных признаков и фармакологических аннотаций выделить группу соединений, наиболее перспективных для дальнейшего целевого изучения. Такая постановка особенно важна при малом числе объектов, поскольку чрезмерно сложные модели и недостаточно строгие схемы валидации могут приводить к завышенным оценкам качества и формировать необоснованно сильные выводы.

Методологически корректная структурно-фармакологическая приоритизация пищевых соединений требует соблюдения нескольких условий. Необходимо стандартизовать химические структуры и исключить скрытое дублирование молекул; сформировать прозрачную карту соответствия между функциональными классами и биологическими эффектами; учитывать неоднородность исходных метрик активности; сравнивать несколько алгоритмов, а не исходить из априорного выбора одной модели; использовать кросс-валидационные схемы, пригодные для малых мульти-лейбл наборов; анализировать не только средние метрики качества, но и ошибки, устойчивость ранжирования и переносимость модели на структурно отличающиеся соединения.

Настоящее исследование направлено на решение указанной задачи применительно к низкомолекулярным соединениям, ассоциированным с хлебной и зерновой матрицей. В работе предложена хемоинформатическая схема bread-bioact, объединяющая курацию структур, извлечение и нормализацию фармакологических данных ChEMBL, расчёт молекулярных дескрипторов, формирование многометочного пространства активности и сравнительную внутреннюю оценку моделей машинного обучения. В отличие от подходов, ориентированных только на один функциональный биологический эффект или один алгоритм, данная схема рассматривает соединения одновременно по четырём классам активности: антиоксидантной, противовоспалительной, противогрибковой и AhR-модулирующей. При этом объектом моделирования являются фармакологические аннотации индивидуальных веществ, а не биологический эффект соединений в составе готового хлеба.

Научная новизна исследования заключается в разработке воспроизводимой схемы предварительного отбора соединений, ассоциированных с хлебной матрицей, по совокупности прогнозируемых структурно-фармакологических признаков в условиях малого и неоднородного набора данных. При построении модели особое значение придавалось контролю переобучения. Для этого сопоставление алгоритмов выполняли во вложенной повторной схеме перекрёстной проверки с учётом многометочной структуры данных; итоговые показатели качества и ранжирование соединений рассчитывали только на основании out-of-fold предсказаний, полученных для объектов, исключённых из обучения на соответствующем этапе. Дополнительно оценивали устойчивость результатов при изменении критериев формирования функциональных меток и при проверке обобщающей способности модели на группах соединений, различающихся по молекулярным каркасам. Независимая внешняя валидация в настоящей работе не проводилась и рассматривается как следующий этап исследования.

Целью исследования являлась разработка и внутренняя оценка хемоинформатической схемы для вероятностной приоритизации биоактивных соединений, ассоциированных с хлебной и зерновой матрицей, на основе структурных дескрипторов и нормализованных фармакологических аннотаций ChEMBL.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи: сформировать и куративно обработать корпус низкомолекулярных соединений, ассоциированных с хлебной и зерновой матрицей; сопоставить указанные соединения с релевантными данными ChEMBL; нормализовать разнородные показатели биологической активности и сформировать бинарные мульти-лейбл метки для четырёх функциональных классов; рассчитать молекулярные дескрипторы и топологические фингерпринты; сравнить несколько алгоритмов машинного обучения в строгой кросс-валидационной схеме; выполнить анализ чувствительности, ошибок и устойчивости ранжирования; а также оценить роль доступных концентрационных сведений как дополнительного описательного слоя.

Рабочая гипотеза состояла в том, что структурные признаки соединений, ассоциированных с хлебной матрицей, в сочетании с куративно нормализованными фармакологическими аннотациями позволяют выявить воспроизводимый сигнал, достаточный для вероятностной приоритизации соединений по нескольким функциональным классам. При этом результаты такого анализа должны рассматриваться как основание для выбора кандидатов для последующей независимой и экспериментальной проверки, но не как замена биологической валидации и не как доказательство активности соединений непосредственно в составе хлеба.

2. Объекты и методы

Объектом исследования являлись низкомолекулярные соединения, ассоциированные с хлебной и зерновой матрицей, а также с ингредиентами и технологическими процессами, характерными для хлебопечения. В корпус включали фенольные кислоты, флавоноиды, ароматические альдегиды и спирты, летучие продукты термических превращений, а также метаболиты дрожжевой и молочнокислой ферментации. Отбор соединений проводили с учётом их описанного присутствия в зерновом сырье, отрубях, солоде, закваске, дрожжевых культурах, пряностях и продуктах тепловой обработки. После сопоставления с химическими записями ChEMBL, стандартизации структур и удаления повторов итоговый набор включал 43 уникальных соединения; для каждого из них была сформирована единая структурная запись и рассчитан набор молекулярных признаков. Аудит ревизионного набора подтвердил отсутствие дубликатов по InChIKey и отсутствие соединений, исключённых из-за недоступности дескрипторов.

Первичная структурная информация была приведена к единому виду с использованием канонических SMILES и InChIKey. На этапе курации удаляли соли и малые фрагменты, выбирали основной органический фрагмент, нормализовали зарядовое состояние и таутомерную форму молекулы. Такая процедура была необходима не только для химической корректности описания, но и для исключения скрытого дублирования, особенно существенного при малом объёме выборки. В дальнейшем единицей анализа считалась не строка исходного списка названий, а одна уникальная химическая структура, идентифицированная по InChIKey.

Фармакологические сведения для отобранных соединений извлекали из базы ChEMBL. Для построения функциональных меток использовали только те записи, которые содержали числовые показатели активности и могли быть отнесены к одному из четырёх заранее заданных направлений: антиоксидантной, противовоспалительной, противогрибковой и AhR-модулирующей активности. Эти сведения рассматривались как фармакологические аннотации индивидуальных молекул, полученные в различных экспериментальных тест-системах, а не как данные о проявлении активности в хлебной матрице. Класс широкой антимикробной активности в основную ревизионную модель не включали, чтобы сохранить согласованность между системой меток, порогами активности и итоговыми таблицами результатов. В отличие от предварительной версии исследования, в которой число классов в разных частях текста колебалось между четырьмя и пятью, в настоящей редакции все расчёты и интерпретации относятся к четырём указанным функциональным классам.

Поскольку сведения ChEMBL получены в различных экспериментальных системах, показатели активности предварительно нормализовали и разделяли по типу биологической метрики. Концентрационно выраженные показатели, такие как IC_{50}, EC_{50}, Ki, Kd, AC_{50} и GI_{50}, приводили к молярным единицам и преобразовывали в величину $p_{Activity}$ по формуле:

$$p_{Activity} = -\log10(CM), \quad (1)$$

где CM — концентрация вещества, моль/л.

Минимальные ингибирующие концентрации, процентные показатели ингибирования или индукции, а также кратность изменения эффекта сохраняли в собственных шкалах, фиксируя направление действия и тип исходного теста. Такой порядок позволял использовать разнородные фармакологические записи, но одновременно требовал дополнительной проверки устойчивости выводов, поскольку ферментативные, клеточные, микробиологические и рецепторные тест-системы не являются биологически равнозначными.

На основе нормализованных записей для каждого соединения формировали бинарные метки активности. Соединение относили к положительным примерам по соответствующему классу, если для него имелись данные, удовлетворяющие заранее заданным порогам активности: достаточная активность в концентрационно выраженных тестах, минимальная ингибирующая концентрация не выше 32 мкг/мл, эффект не менее 50 % в процентных тестах или не менее чем двукратное изменение в тестах с оценкой кратности эффекта. Для проверки влияния неоднородности исходных метрик дополнительно сравнивали три варианта разметки: основной, включающий все допустимые типы числовых наблюдений; более строгий, основанный только на концентрационно выраженных показателях активности; и промежуточный, в котором к концентрационным показателям добавлялись данные минимальной ингибирующей концентрации. Такое сопоставление позволило оценить, сохраняются ли результаты при исключении наиболее гетерогенных типов наблюдений. Подробные критерии формирования функциональных меток приведены в Таблице 1.

Таблица 1. **Критерии формирования функциональных меток**

Table 1. **Criteria for formation of functional labels**

A. Правила перевода исходных фармакологических наблюдений в бинарные метки

A. Rules for transforming initial pharmacological observations into binary labels

Тип исходного наблюдения	Принцип нормализации	Критерий положительной метки	Методическое примечание
Концентрационно выраженные показатели активности (IC_{50}, EC_{50}, Ki, Kd, AC_{50}, GI_{50} и др.)	Приведение к молярным единицам с последующим расчётом pActivity	Значение не выше предварительно заданного порога активности для соответствующего функционального класса	Данный критерий использовали во всех вариантах разметки
Минимальная ингибирующая концентрация (MIC, MBC, MFC и родственные показатели)	Приведение к единой шкале концентраций, мкг/мл	⩽ 32 мкг/мл	Включалась в основную и промежуточную схемы разметки
Процентный эффект (ингибирование, индукция, биологическая активность в процентах)	Сохранение в исходной шкале после проверки направления эффекта	⩾ 50 %	Использовался только в расширенной схеме разметки
Кратность изменения эффекта (отношение значений)	Сохранение в нормализованной шкале кратности	⩾ 2	Использовался только в расширенной схеме разметки
Направление эффекта	Ингибирующие эффекты учитывали напрямую; индуцирующие эффекты приводили к единой направленности относительно референсного состояния	—	Этап выполняли до бинаризации наблюдений
Отнесение к отрицательному классу	После фильтрации по релевантным конечным точкам и типам наблюдений	Соединение считали отрицательным, если не было ни одного наблюдения, удовлетворяющего критерию положительности	Оценка проводилась отдельно для каждого функционального класса

Таблица 1. **Окончание** / Table 1. **End**

Б. Функциональные классы, использованные в ревизионной модели
B. Functional classes used in the revisionary model

Функциональный класс	Содержательная интерпретация	Число положительных соединений, *n* (%)	Примечание
Антиоксидантная активность	Показатели, отражающие антиоксидантный ответ и/или ингибирование процессов, связанных с окислительным повреждением	21 (48,8)	Наиболее распространённый класс в ревизионном корпусе
Противовоспалительная активность	Показатели, характеризующие ослабление воспалительного ответа	11 (25,6)	По итогам ревизионного прогона данный класс оказался наиболее устойчивым
Противогрибковая активность	Микробиологические и фармакологические конечные точки, относящиеся к подавлению роста грибов	12 (27,9)	Более редкий и менее стабильный класс по сравнению с противовоспалительным
AhR-модулирующая активность	Показатели, отражающие модуляцию сигнального пути арилуглеводородного рецептора	10 (23,3)	Включён во все основные ревизионные расчёты

Примечание. В статье использовали четыре функциональных класса; класс широкой антимикробной активности в основную оценку не включали. Для анализа чувствительности дополнительно сопоставляли три схемы разметки: расширенную, объединявшую все допустимые типы числовых наблюдений; строгую, основанную только на концентрационно выраженных показателях активности; и промежуточную, в которой к концентрационным показателям добавлялись данные минимальной ингибирующей концентрации. Переход к более строгим схемам сопровождался умеренным снижением усреднённой точности ранжирования положительных примеров, тогда как добавление MIC-сигнала не изменяло общую структуру ранжирования.
Источник: составлено авторами.

Таблица 2. **Параметры сравниваемых моделей и схема перекрёстной проверки**
Table 2. **Parameters of the compared models and scheme of cross-validation**

А. Сравниваемые модели
A. Compared models

Модель	Статус в сравнении	Параметры внутреннего подбора	Реализация
Логистическая регрессия	Линейная базовая модель	Параметры регуляризации и штрафа	CPU
Случайный лес	Ансамблевый метод	Число деревьев, глубина деревьев, минимальные размеры узлов, объём случайного подпространства признаков	CPU, многопоточный режим
CatBoost	Градиентный бустинг на решающих деревьях	Скорость обучения, глубина деревьев, число итераций, параметры регуляризации	GPU
XGBoost	Градиентный бустинг на решающих деревьях	Скорость обучения, глубина деревьев, число деревьев, параметры подвыборки объектов и признаков, регуляризация	GPU

Б. Схема перекрёстной **проверки и отбора модели**
B. Scheme of **cross-validation and model selection**

Элемент методики	Реализация в ревизионном анализе	Назначение
Постановка задачи	Для каждого функционального класса строили отдельный бинарный классификатор на общем пространстве молекулярных признаков	Обеспечение прозрачной многометочной постановки на малом корпусе
Внешний контур перекрёстной проверки	5 разбиений × 10 повторов, всего 50 out-of-fold проверочных разбиений; не является независимой внешней валидацией	Внутренняя оценка качества без переиспользования тестовой информации
Внутренний контур настройки	Подбор параметров выполняли только внутри обучающей части каждого внешнего разбиения перекрёстной проверки	Исключение утечки информации при выборе гиперпараметров
Тип стратификации	Многометочная стратификация	Сохранение структуры совместной встречаемости меток при разбиении выборки
Итоговые предсказания	Использовали только out-of-fold проверочные предсказания	На их основе рассчитывали метрики, выполняли анализ ошибок и строили итоговое ранжирование
Основной критерий качества	Macro Average Precision	Наиболее информативная метрика для задач приоритизации при несбалансированных классах
Дополнительные показатели	Macro ROC-AUC и средняя ошибка Brier	Оценка разделимости классов и калибровки вероятностей
Критерий выбора итоговой модели	Максимальное среднее значение Macro Average Precision с применением правила одной стандартной ошибки	Предпочтение более устойчивой модели при близком уровне качества
Доверительные интервалы	95 % доверительные интервалы, рассчитанные бутстреп-процедурой	Количественная оценка неопределённости итоговых метрик
Обработка вырожденных разбиений	Для отдельных классов при необходимости использовали константную вероятностную модель	Предотвращение численной нестабильности в обучении
Дополнительная проверка обобщающей способности	Стресс-проверка с разделением по структурным каркасам молекул: 3 разбиения по 13 группам молекулярных каркасов	Оценка переносимости внутри текущего корпуса на химически более удалённые соединения

Примечание. В таблице приведены группы параметров, определяющие структуру и сложность сравниваемых моделей, а также схема внутренней перекрёстной проверки. Результаты сравнительного отбора модели приведены в разделе «Результаты и обсуждение».
Источник: составлено авторами.

Молекулярное описание соединений включало два взаимодополняющих блока признаков. Первый блок составляли физико-химические дескрипторы, отражающие размер молекулы, полярность, липофильность, способность к образованию водородных связей, ароматичность, насыщенность и конформационную гибкость. Второй блок представлял собой топологические фингерпринты Morgan, кодирующие локальное атомное окружение молекулы. В совокупности для каждого соединения было рассчитано 2058 признаков, что обеспечивало достаточно подробное описание химической структуры, но одновременно усиливало необходимость строгой проверки модели из-за несоответствия между числом признаков и числом объектов.

Модельный анализ был построен как задача многометочной классификации, при которой для каждого функционального класса обучался отдельный бинарный классификатор на общем пространстве молекулярных признаков. Такой подход был выбран как наиболее прозрачный для малого корпуса соединений: он позволял независимо оценивать качество прогноза по каждому направлению активности и избегать искусственного моделирования всех возможных комбинаций меток. Для исключения необоснованной привязки к одному алгоритму сравнивали несколько моделей различной сложности: логистическую регрессию как линейный базовый метод, случайный лес как устойчивый ансамблевый алгоритм [33], а также CatBoost и XGBoost как реализации градиентного бустинга. Окончательный выбор модели проводили не априорно, а по результатам сравнительной проверки, представленной в разделе «Результаты и обсуждение».

С учётом малого объёма корпуса основную оценку качества выполняли не на одном разбиении обучающей и тестовой выборок, а во вложенной повторной перекрёстной проверке. Внешний контур этой перекрёстной проверки включал пять разбиений и десять повторов, а внутренний контур использовался только для подбора гиперпараметров. Следует подчеркнуть, что под внешним контуром в данном случае понимается только проверочная часть вложенной кросс-валидации; независимый внешний набор данных в настоящей работе не использовали. Итоговые метрики рассчитывались по out-of-fold предсказаниям для тех соединений, которые в соответствующем внешнем разбиении не участвовали в обучении модели. Это принципиально отличает ревизионную схему от предварительного варианта анализа, в котором сохранялся риск завышения качества из-за использования одних и тех же объектов при обучении и оценке. Параметры сравниваемых моделей и схема перекрёстной проверки приведены в Таблице 2.

Основной метрикой качества была средняя точность ранжирования положительных примеров, поскольку она лучше отражает пригодность модели для приоритизации соединений при несбалансированных классах. Дополнительно рассчитывали площадь под ROC-кривой и вероятностную ошибку Brier, характеризующую калибровку предсказанных вероятностей. Метрики определяли как для каждого функционального класса отдельно, так и в усреднённом виде по всем четырём классам. Для ключевых сводных показателей рассчитывали доверительные интервалы, что позволило не ограничиваться точечными оценками качества.

Особое внимание уделяли анализу устойчивости выводов. Во-первых, сравнивали результаты при разных вариантах формирования функциональных меток, чтобы оценить возможное влияние неоднородности IC_{50}, EC_{50}, Ki, MIC, процентных эффектов и других типов биологических измерений. Во-вторых, анализировали ошибки классификации, выделяя ложноположительные и ложноотрицательные случаи по каждому классу активности. В-третьих, выполняли дополнительную проверку с разделением соединений по структурным каркасам молекул. Такая проверка является более строгой, чем обычная перекрёстная валидация, поскольку оценивает переносимость модели на химически менее близкие соединения. В ревизионном анализе она рассматривалась как стресс-тест обобщающей способности, а не как замена основной схемы оценки.

Для итогового ранжирования соединений использовали среднюю предсказанную вероятность активности по четырём функциональным классам, рассчитанную на основе out-of-fold проверочных предсказаний. Все классы при этом имели равный вес. Такой способ ранжирования был выбран для того, чтобы не усиливать искусственно вклад редких классов и не смещать итоговый рейтинг за счёт поправочных коэффициентов, зависящих от распространённости меток. Мультипликативный индекс, применявшийся в предварительной версии анализа, был оставлен только для сопоставления с прежними результатами и не использовался как основной критерий приоритизации.

Концентрационные данные о присутствии соединений в хлебной матрице рассматривались отдельно от модельного ранжирования. Они не включались в обучающие признаки, не использовались при расчёте предсказанных вероятностей и не изменяли итоговый рейтинг соединений. Такой подход обусловлен неполным покрытием корпуса: сопоставленные концентрационные сведения были доступны только для 4 из 43 соединений. Поэтому концентрационный слой использовали исключительно как дополнительный контекст при обсуждении физиологической интерпретируемости результатов, но не как доказательство функциональной значимости ведущих кандидатов.

Все этапы анализа были реализованы в едином воспроизводимом вычислительном контуре на языке Python: от сопоставления соединений с ChEMBL и стандартизации структур до расчёта дескрипторов, формирования меток, сравнения моделей, оценки ошибок и построения итогового ранга. Для подготовки данных использовали pandas и NumPy; для сопоставления с ChEMBL — chembl_webresource_client; для стандартизации структур, расчёта дескрипторов и Morgan-фингерпринтов — RDKit; для стратифицированной перекрёстной проверки, логистической регрессии, случайного леса и расчёта метрик — scikit-learn и iterative-stratification; для градиентного бустинга — CatBoost и XGBoost. Повторяемость расчётов обеспечивали фиксированными начальными состояниями генераторов случайных чисел. При подготовке настоящей редакции использовались только результаты ревизионного контура, основанные на повторной перекрёстной проверке и out-of-fold предсказаниях; предварительные расчёты с одиночным разбиением или оценкой на обучающих объектах в итоговые выводы не включались.

3. Результаты и обсуждение

После сопоставления исходного перечня соединений с ChEMBL, стандартизации химических структур и удаления повторов был сформирован итоговый корпус, основные параметры которого представлены в Таблице 3. Таблица фиксирует состав набора и распределение функциональных меток и служит отправной точкой для последующей оценки моделей.

Таблица 3. **Характеристика сформированного набора данных и распределение функциональных меток**

Table 3. **Characteristics of the formed data set and distribution of functional labels**

Показатель	Значение
Общая характеристика набора	
Число уникальных соединений	43
Число молекулярных признаков на одно соединение	2058
Соединений с рассчитанными дескрипторами	43
Исключено из-за недоступности дескрипторов	0
Дубликаты по InChIKey после курации	0
Распределение положительных функциональных меток	
Антиоксидантная активность	21 (48,8 %)
Противовоспалительная активность	11 (25,6 %)
Противогрибковая активность	12 (27,9 %)
AhR-модулирующая активность	10 (23,3 %)

Примечание. Одно и то же соединение могло иметь более одной функциональной метки; поэтому доли по классам не являются взаимоисключающими.
Источник: составлено авторами.

Распределение положительных меток по функциональным классам было неравномерным: наиболее представленным оказался антиоксидантный класс, тогда как противовоспалительное, противогрибковое и AhR-модулирующее направления были более редкими. Поскольку одно и то же соединение могло иметь несколько функциональных меток, доли по классам не являются взаимоисключающими. Такая структура набора подтверждает необходимость использовать метрики ранжирования и вероятностной оценки, а не ограничиваться простой долей верных классификаций.

Сравнительный анализ моделей показал преимущество случайного леса по основной метрике и его наиболее благоприятное соотношение качества и устойчивости. Логистическая регрессия показала близкий результат и использовалась как референтная модель, тогда как CatBoost и XGBoost не дали выигрыша на малом корпусе. Сводные численные показатели приведены в Таблице 4.

Таблица 4. **Сравнение моделей по результатам вложенной повторной перекрёстной проверки**
Table 4. **Comparison of the models by the results of the nested repeated cross-validation**

Модель	Средняя точность (Macro AP)	95 % ДИ для Macro AP	Macro ROC-AUC	Средняя ошибка Brier	Итог сравнительного отбора
Случайный лес	0,8041	0,7766–0,8320	0,8056	0,1750	Выбрана как итоговая модель
Логистическая регрессия	0,7886	0,7579–0,8191	0,7944	0,1760	Референтная модель
XGBoost	0,7610	0,7253–0,7971	0,7765	0,1741	Не показала преимуществ
CatBoost	0,7042	0,6730–0,7350	0,7430	0,1838	Не показала преимуществ

Примечание. Итоговая модель выбиралась по основной метрике и правилу одной стандартной ошибки.
Источник: составлено авторами.

Полученное соотношение моделей имеет принципиальное значение для интерпретации дальнейших результатов. Более сложные бустинговые алгоритмы не улучшили качество прогноза по сравнению со случайным лесом и линейной референтной моделью. Это указывает на то, что в сформированном наборе присутствует структурно-фармакологический сигнал, однако его извлечение не требует чрезмерного усложнения алгоритма. Поэтому в последующих расчётах использовалась модель случайного леса, выбранная по основной метрике и правилу одной стандартной ошибки как наиболее обоснованный вариант для малого и неоднородного корпуса. Такой результат согласуется с методическими данными о том, что при малых и структурно связанных химических наборах усложнение алгоритма не всегда повышает обобщающую способность, а выбор модели должен сопровождаться вложенной проверкой, исключающей смещение при подборе параметров [25,26].

Сопоставление с опубликованными работами показывает, что полученные показатели находятся в ожидаемом диапазоне для задач вычислительной приоритизации, однако не являются напрямую сопоставимыми из-за различий в объектах, целевых переменных и схемах валидации. В ранее опубликованных моделях ERα и мультитаргетного отбора флавоноидов использовались иные наборы данных, постановки задач и процедуры проверки [31,32]. Внешние исследования пищевых и природных соединений также подтверждают релевантность такого подхода: PhyteByte прогнозирует биоактивные пищевые молекулы по данным ChEMBL и пищевого состава [27], Reker et al. показали применимость машинного обучения для выявления биологических эффектов потребляемых соединений и вспомогательных веществ [28], а Sanchez-Ruiz и Colmenarejo продемонстрировали возможность системного анализа и прогнозирования белковых мишеней пищевых соединений [29]. На этом фоне разработанная схема bread-bioact занимает более узкую нишу: она не заменяет экспериментальную проверку, а обеспечивает матрично-ориентированную, но основанную на ChEMBL, приоритизацию соединений, ассоциированных с хлебной матрицей.

Поклассовая оценка выбранной модели выявила различия в степени предсказуемости отдельных функциональных направлений. Наиболее устойчивым оказался противовоспалительный класс, тогда как антиоксидантная активность, несмотря на наибольшее число положительных примеров, характеризовалась менее однородным вероятностным разделением. Поклассовые значения средней точности, ROC-AUC и ошибки Brier приведены в Таблице 5.

Таблица 5. **Поклассовые метрики выбранной модели**
Table 5. **Class-level metrics of the selected model**

Функциональный класс	Положительных соединений, *n* (%)	Средняя точность (AP)	ROC-AUC	Ошибка Brier
Противовоспалительная активность	11 (25,6 %)	0,8680	0,9116	0,1444
AhR-модулирующая активность	10 (23,3 %)	0,8095	0,8142	0,1524
Антиоксидантная активность	21 (48,8 %)	0,7759	0,7364	0,2208
Противогрибковая активность	12 (27,9 %)	0,7630	0,7602	0,1821

Примечание. Наиболее устойчивые результаты получены для противовоспалительного класса; наименее однородным оказался антиоксидантный класс.
Источник: составлено авторами.

Таким образом, наиболее устойчивый сигнал был связан с противовоспалительным направлением, тогда как антиоксидантный класс объединял химически и, вероятно, механистически различающиеся группы соединений. Это обстоятельство важно для интерпретации, поскольку антиоксидантные свойства пищевых фенолов часто рассматриваются как наиболее очевидный эффект, тогда как модельная оценка показывает необходимость более осторожной трактовки. Поклассовые значения средней точности и площади под ROC-кривой представлены на Рисунке 1 и Рисунке 2 как визуальное сопровождение количественных метрик Таблицы 5.

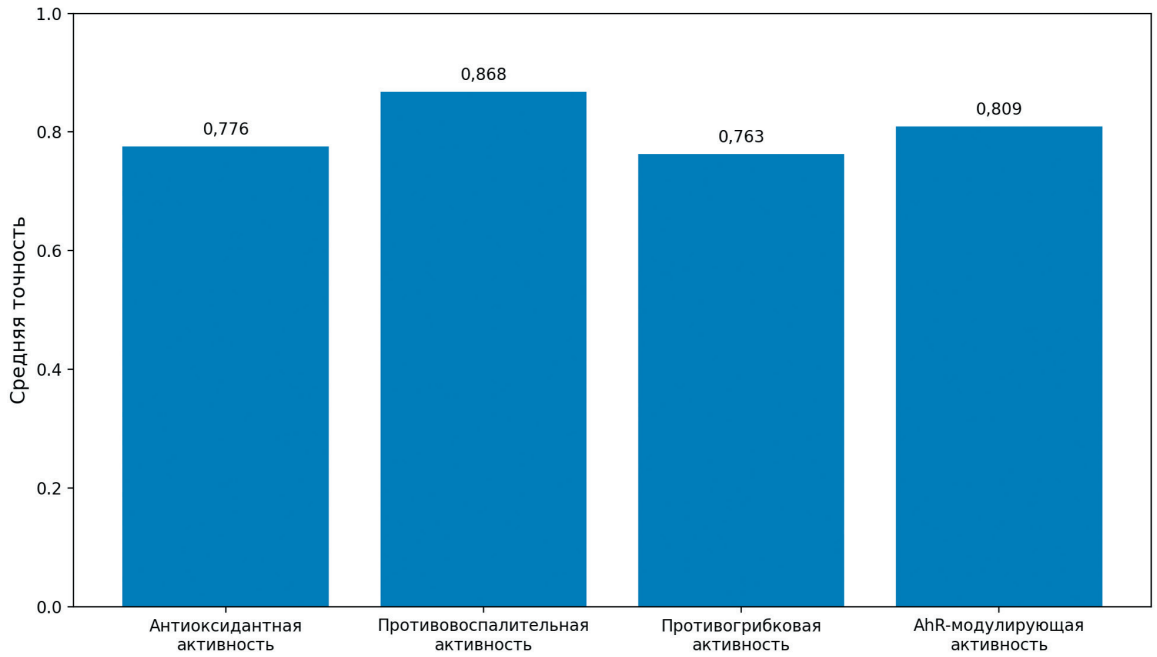


Рисунок 1. **Поклассовые значения средней точности выбранной модели**
Figure 1. **Class-level average precision values of the selected model**

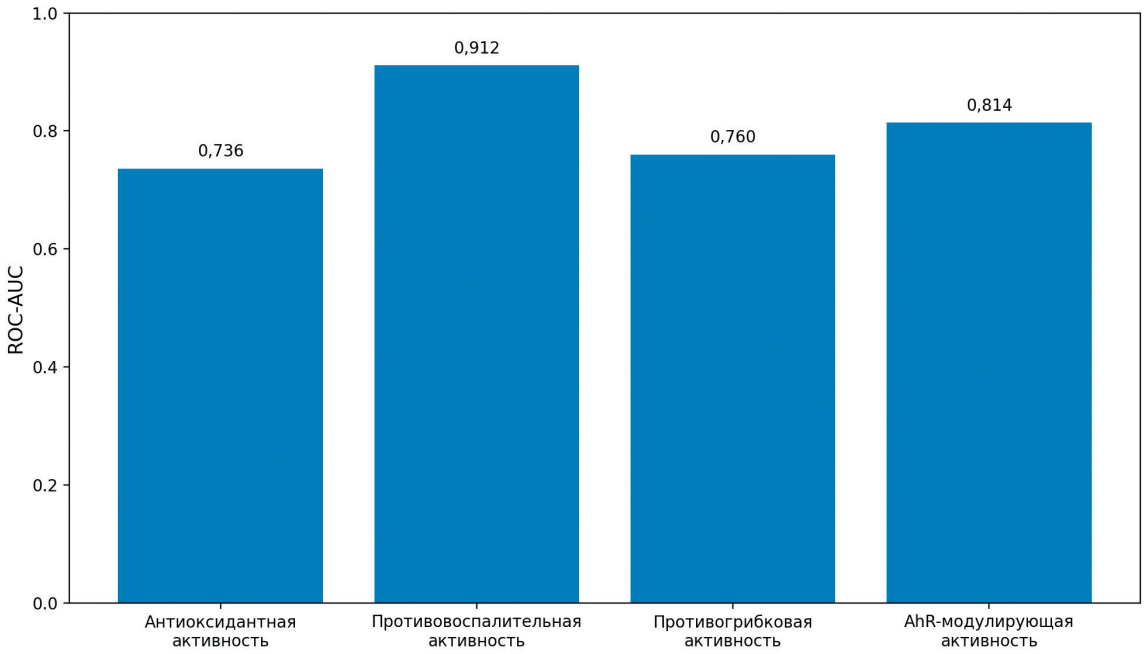


Рисунок 2. **Поклассовые значения ROC-AUC выбранной модели**
Figure 2. **Class-level ROC-AUC values of the selected model**

С учётом разнородности фармакологических данных была отдельно проверена устойчивость результатов к способу формирования функциональных меток. В основной схеме учитывались все допустимые числовые типы наблюдений, включая концентрационно выраженные показатели активности, минимальные ингибирующие концентрации, процентные эффекты и показатели кратности изменения. При переходе к более строгой схеме, основанной только на концентрационно выраженных показателях, средняя точность снизилась с 0,8041 до 0,7678, тогда как площадь под ROC-кривой увеличилась с 0,8056 до 0,8230, а ошибка Brier уменьшилась с 0,1750 до 0,1605. Добавление минимальных ингибирующих концентраций к концентрационным показателям не изменило итоговых значений. Эти результаты представлены в Таблице 6.

Такое соотношение показателей свидетельствует о том, что расширенная схема разметки несколько лучше поддерживает ранжирование положительных примеров, тогда как более строгая схема обеспечивает более благоприятную разделимость и калибровку вероятностей. Важно, однако, что изменение способа разметки не приводило к перестройке всей иерархии соединений. Между основной и более строгой схемами совпадали 8 из 10 первых позиций, а коэффициент ранговой корреляции Спирмена составлял 0,915. При сравнении двух строгих вариантов разметки совпадение первой десятки было полным, а коэффициент Спирмена равнялся 1,000. Следовательно, верхняя часть рейтинга не является артефактом одного конкретного способа бинаризации фармакологических данных.

Итоговое ранжирование соединений проводилось по средней вероятностной оценке активности, рассчитанной по четырём функциональным классам с равным вкладом каждого класса. Такой подход позволил отказаться от прежнего мультипликативного индекса, в котором редкие классы могли получать чрезмерное влияние за счёт поправочного коэффициента распространённости. Переход к равновзвешенной вероятностной оценке сохранил верхнюю часть рейтинга, но сделал принцип приоритизации более прозрачным.

Наибольшие интегральные оценки были получены преимущественно для соединений фенольной и полифенольной природы. В первую десятку вошли протокатеховая, кофейная, галловая и феруловая кислоты, кверцетин, (+)-катехин, гидроксибензойная кислота, ванилин, сиринговая кислота и эвгенол. Список соединений и значения интегральной оценки приведены в Таблице 7, а распределение вероятностей по отдельным функциональным классам для ведущих кандидатов представлено на Рисунке 3.

Рисунок 3 необходим для интерпретации не только общего ранга, но и профиля каждого кандидата. Интегральная оценка может формироваться разными сочетаниями классов: одни соединения занимают высокие позиции за счёт более сбалансированного профиля, тогда как другие демонстрируют локальный вклад одного-двух направлений активности. Поэтому тепловая карта позволяет различать соединения, перспективные для широкой предварительной проверки, и кандидаты, более релевантные для отдельных гипотез, например противовоспалительной или AhR-модулирующей. Одновременно такой профиль подчёркивает ограничение исследования: высокий ранг отражает структурно-фармакологическое сходство с активными аннотациями ChEMBL, но не является прямым доказательством биологической эффективности молекулы в составе хлеба.

Анализ ошибок подтвердил различия между функциональными направлениями. Наиболее благоприятный профиль был характерен для противовоспалительного класса, тогда как антиоксидантная активность сопровождалась наибольшим числом как ложноположительных, так и ложноотрицательных случаев. Сводный профиль ошибок при пороге вероятности 0,5 приведён в Таблице 8.

Таблица 6. **Устойчивость результатов при различных схемах формирования функциональных меток**
Table 6. **Stability of the results in different schemes of the formation of functional labels**

Схема формирования функциональных меток	Используемые типы фармакологических наблюдений	Средняя точность (Macro AP)	Macro ROC-AUC	Средняя ошибка Brier	Совпадение первой десятки с основной схемой	Коэффициент Спирмена
Основная схема	Концентрационно выраженные показатели, минимальные ингибирующие концентрации, процентные эффекты и показатели кратности изменения	0,8041	0,8056	0,1750	—	—
Строгая схема	Только концентрационно выраженные показатели активности	0,7678	0,8230	0,1605	8/10	0,915
Промежуточная схема	Концентрационно выраженные показатели активности и минимальные ингибирующие концентрации	0,7678	0,8230	0,1605	8/10	0,915

Примечание. При сравнении строгой и промежуточной схем совпадение первой десятки составило 10/10, коэффициент Спирмена равен 1,000.
Источник: составлено авторами.

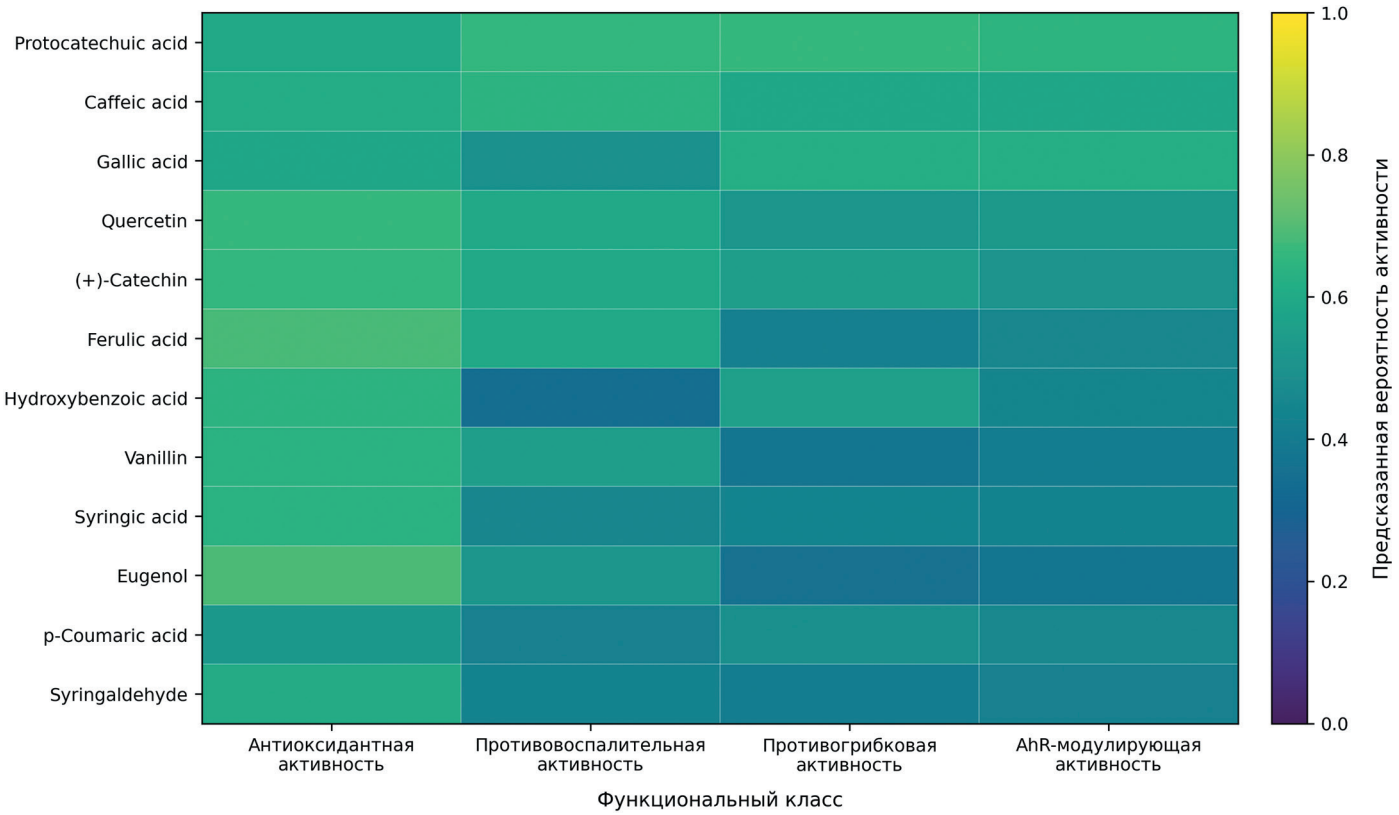


Рисунок 3. **Вероятностные профили соединений с наибольшей интегральной оценкой структурно-фармакологической приоритизации. Цветовая шкала отражает предсказанную вероятность активности по каждому функциональному классу**
Figure 3. **Probability profiles of compounds with the highest integral score of structural-pharmacological prioritization. The color scale represents the predicted probability of activity in each functional class**

Таблица 7. **Десять соединений с наибольшей интегральной вероятностной оценкой структурно-фармакологической приоритизации**
Table 7. **Ten compounds with the highest integral probability-based score of structural-pharmacological prioritization**

№	Соединение	Источник происхождения	Средняя out-of-fold вероятностная оценка
1	Протокатеховая кислота	Отруби	0,6416
2	Кофейная кислота	Отруби	0,6057
3	Галловая кислота	Добавки / отруби	0,5793
4	Кверцетин	Добавки / отруби	0,5773
5	(+)-Катехин	Добавки / солод	0,5771
6	Феруловая кислота	Отруби	0,5401
7	Гидроксибензойная кислота	Отруби	0,5003
8	Ванилин	Термически образованные соединения	0,4934
9	Сиринговая кислота	Отруби	0,4903
10	Эвгенол	Пряности	0,4872

Примечание. Интегральная оценка рассчитывалась как средняя out-of-fold вероятностная оценка активности по четырём функциональным классам при равном вкладе каждого класса.
Источник: составлено авторами.

Наиболее выраженные ложноположительные предсказания в антиоксидантном классе относились к эвгенолу, гидроксибензойной кислоте, ацетоину, индол-3-уксусной кислоте и р-кумаровой кислоте. Среди ложноотрицательных примеров находились γ-аминомасляная кислота, фенол, 2-метилфуран, индол, триптофол, тирамин и гистамин. Эти данные позволяют уточнить характер ограничений модели: антиоксидантный класс, по-видимому, объединяет соединения с различными структурными основаниями активности, что снижает однозначность вероятностной классификации. Подробные примеры ложноположительных и ложноотрицательных случаев приведены в Таблице 9.

Таблица 8. **Сводный профиль ошибок выбранной модели по функциональным классам**
Table 8. **Summary error profile of the selected model by functional classes**

Функциональный класс	Истинно положительные	Истинно отрицательные	Ложноположительные	Ложноотрицательные
Антиоксидантная активность	14	15	7	7
Противовоспалительная активность	7	31	1	4
Противогрибковая активность	6	31	0	6
AhR-модулирующая активность	5	33	0	5

Примечание. Профиль ошибок приведён при пороговом значении вероятности 0,5.
Источник: составлено авторами.

Дополнительная проверка переносимости модели была выполнена с разделением соединений по молекулярным каркасам. В стандартной повторной перекрёстной проверке усреднённая средняя точность составляла 0,8041, а площадь под ROC-кривой 0,8056. При более строгом разделении по структурным каркасам эти значения снижались до 0,6245 и 0,6627 соответственно. Данная процедура включала три проверочных разбиения по 13 группам молекулярных каркасов и рассматривалась как дополнительная проверка обобщающей способности модели, а не как замена основной схемы оценки. Результаты сопоставления представлены на Рисунке 4.

Снижение качества при разделении по структурным каркасам показывает, что часть предсказательной способности модели связана со структурной близостью соединений внутри текущего корпуса. Следовательно, полученные результаты характеризуют прежде всего внутреннюю устойчивость модели в пределах сформированного химического пространства и не должны без дополнительной

Таблица 9. **Репрезентативные ложноположительные и ложноотрицательные предсказания выбранной модели**
Table 9. **Representative false positive and false negative predictions of the selected model**

Функциональный класс	Тип случая	Соединение	Предсказанная вероятность	Методическое значение примера
Антиоксидантная активность	Ложноположительный	Эвгенол	0,6897	Высокая вероятность при отсутствии положительной метки; пример возможного структурного сходства с активными фенольными соединениями
Антиоксидантная активность	Ложноположительный	Гидроксибензойная кислота	0,6422	Соединение входит в верхнюю часть ранга, но является ошибочным случаем для данного класса
Антиоксидантная активность	Ложноположительный	Ацетоин	0,5798	Показывает возможность переноса сигнала на химически менее типичное соединение
Антиоксидантная активность	Ложноположительный	Индол-3-уксусная кислота	0,5549	Иллюстрирует пограничную область между ароматическими метаболитами и фенольными соединениями
Антиоксидантная активность	Ложноположительный	р-Кумаровая кислота	0,5241	Вероятность близка к пороговому уровню; пример неоднозначного фенольного профиля
Антиоксидантная активность	Ложноотрицательный	γ-Аминомасляная кислота	0,2658	Низкая вероятность при наличии положительной метки; пример химически отличающегося положительного объекта
Антиоксидантная активность	Ложноотрицательный	Фенол	0,3587	Показывает ограниченность структурного сигнала для простых ароматических соединений
Антиоксидантная активность	Ложноотрицательный	2-Метилфуран	0,3825	Пограничный случай для летучих соединений термического происхождения
Антиоксидантная активность	Ложноотрицательный	Индол	0,4129	Иллюстрирует неоднозначность индольных производных для антиоксидантного класса
Антиоксидантная активность	Ложноотрицательный	Триптофол	0,4199	Пограничный метаболит ферментационного происхождения
Антиоксидантная активность	Ложноотрицательный	Тирамин	0,4340	Пример амина, недостаточно хорошо описываемого антиоксидантным структурным профилем
Антиоксидантная активность	Ложноотрицательный	Гистамин	0,4538	Вероятность ниже порога при положительной метке; отражает неоднородность класса
Противовоспалительная активность	Ложноположительный	Карвакрол	0,5435	Единственный выраженный ложноположительный пример для наиболее устойчивого класса
Противовоспалительная активность	Ложноотрицательный	Триптофол	—	Химически правдоподобный кандидат, не достигший порогового уровня вероятности
Противовоспалительная активность	Ложноотрицательный	Гидроксибензойная кислота	—	Пример расхождения между ранговым положением соединения и отдельным функциональным классом
Противовоспалительная активность	Ложноотрицательный	Тимол	—	Пограничный случай среди ароматических соединений пряностей
Противовоспалительная активность	Ложноотрицательный	Галловая кислота	—	Высокоранговое соединение, не всегда корректно классифицируемое по отдельному классу

Примечание. Знак «—» означает, что точная агрегированная вероятность для данного соединения не была приведена в сводном отчёте; случай включён как репрезентативный пример ошибки соответствующего класса.
Источник: составлено авторами.

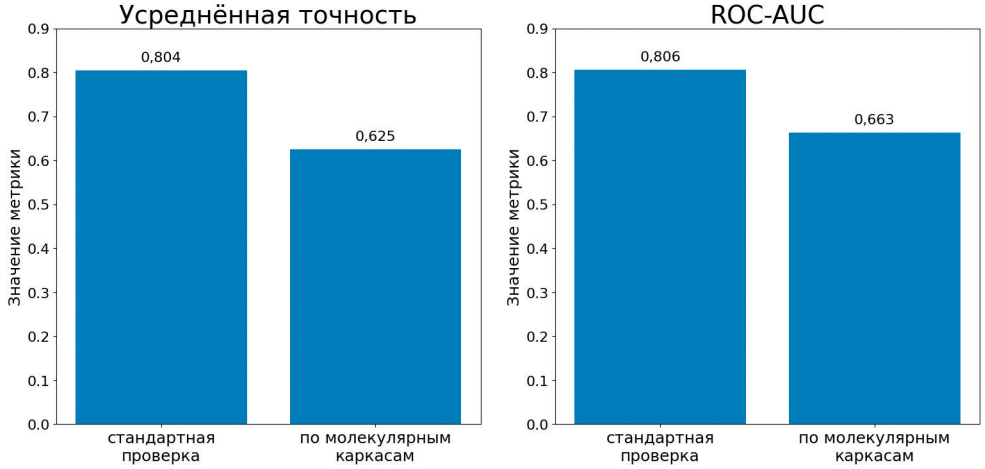


Рисунок 4. **Сопоставление качества модели при стандартной повторной перекрёстной проверке и при проверке с разделением соединений по молекулярным каркасам**
Figure 4. **Comparison of model performance under standard repeated cross-validation and validation with compound separation by molecular scaffolds**

Таблица 10. **Концентрационные сведения для соединений, сопоставленных с хлебной матрицей**

Table 10. **Concentration data for compounds compared with the bread matrix**

Ранг по вероятностной оценке	Соединение	Средняя вероятностная оценка	Концентрационные сведения, мг/кг	Интерпретация для настоящей работы
21	4-Винилфенол	0,3846	Имеется совпавшая ссылка, но без устойчивого числового резюме в объединённой таблице	Концентрационные сведения подтверждают наличие соединения в хлебной матрице, но не позволяют использовать его как количественный ранжирующий фактор
23	Ацетоин	0,3747	0,05–0,10	Соединение относится к среднему рангу; концентрационный слой имеет описательное значение
33	2,3-Бутандиол	0,2877	0,01–0,50	Низкая вероятностная оценка при наличии концентрационных сведений; пример независимости концентрационного слоя от модельного ранга
40	Этанол	0,2604	0,058–12800,0	Широкий диапазон концентраций отражает технологическую вариабельность и не используется для изменения ранга

Примечание. Концентрационные значения нормированы к мг/кг и использованы только как описательный слой. Они не входили в обучающие признаки, не изменяли предсказанные вероятности и не использовались при формировании основного рейтинга соединений.
Источник: составлено авторами.

проверки переноситься на широкие внешние библиотеки соединений. Этот вывод является существенным для последующего обсуждения, поскольку задаёт границы применимости разработанной вычислительной схемы. Полученный результат согласуется с общей проблемой смещения, связанного со структурной близостью соединений в хемоинформатических наборах данных, и подчёркивает необходимость проверки моделей на химически независимых группах объектов [25,26].

Концентрационные сведения о присутствии соединений в хлебной матрице были проанализированы отдельно от модельного ранжирования. В ревизионном наборе такие сведения удалось сопоставить только для 4 из 43 соединений. Все значения были приведены к единой шкале, однако не использовались при обучении моделей, расчёте вероятностей или изменении итогового ранга. Это решение было обусловлено неполным покрытием корпуса концентрационными данными и необходимостью отделить структурно-фармакологическую приоритизацию от оценки реального содержания соединений в пищевой матрице.

Ни одно из соединений, вошедших в первую десятку рейтинга, не имело надёжного концентрационного резюме в объединённой таблице ревизионного анализа. Сопоставленные концентрационные данные относились главным образом к соединениям среднего и нижнего рангов, включая ацетоин, 2,3-бутандиол и этанол. Поэтому концентрационный блок в настоящей работе выполняет только описательную функцию и не может служить самостоятельным подтверждением физиологической значимости ведущих кандидатов. Детализированные концентрационные сведения приведены в Таблице 10.

В совокупности результаты показывают, что в сформированном корпусе соединений, ассоциированных с хлебной матрицей, выявляется воспроизводимый структурно-фармакологический сигнал, достаточный для вероятностной приоритизации кандидатов. Вместе с тем различия между функциональными классами, неодинаковый профиль ошибок, снижение качества при разделении по молекулярным каркасам, отсутствие независимого внешнего набора данных и ограниченность концентрационных сведений задают необходимые границы интерпретации. Поэтому полученные данные следует рассматривать как основание для отбора перспективных соединений для последующей внешней и экспериментальной проверки, а не как окончательное подтверждение их функциональной эффективности в составе пищевого продукта.

4. Выводы

В результате проведённого исследования разработана и апробирована хемоинформатическая схема внутренней вероятностной приоритизации низкомолекулярных соединений, ассоциированных с хлебной и зерновой матрицей. Сформированный корпус включал 43 уникальных соединения, для которых после структурной курации и исключения дубликатов был рассчитан комплекс молекулярных признаков и сформированы бинарные метки по четырём функциональным направлениям: антиоксидантному, противовоспалительному, противогрибковому и AhR-модулирующему. Тем самым была создана воспроизводимая основа для сопоставления химической структуры соединений с доступными фармакологическими аннотациями ChEMBL.

Сравнительный анализ моделей показал, что на данном наборе соединений наилучшее сочетание качества и устойчивости обеспечивает алгоритм случайного леса. Его усреднённая по четырём классам средняя точность ранжирования положительных примеров составила 0,8041 при 95 % доверительном интервале 0,7766–0,8320; площадь под ROC-кривой равнялась 0,8056, а средняя ошибка Brier 0,1750. Полученные показатели характеризуют внутреннюю проверку во вложенной повторной перекрёстной схеме и не должны трактоваться как результат независимой внешней валидации.

Поклассовый анализ выявил неодинаковую степень предсказуемости функциональных направлений. Наиболее согласованный результат был получен для противовоспалительной активности, тогда как антиоксидантный класс, несмотря на наибольшее число положительных примеров, характеризовался более выраженной неоднородностью и менее благоприятным профилем ошибок. Это указывает на то, что антиоксидантная активность в рамках рассматриваемого корпуса, вероятно, объединяет несколько различных химико-биологических механизмов и потому требует более осторожной интерпретации, чем классы с более однородным модельным сигналом.

Итоговое ранжирование соединений позволило выделить группу фенольных и полифенольных кандидатов с наибольшей интегральной вероятностной оценкой структурно-фармакологической приоритизации. В верхние позиции вошли протокатеховая, кофейная, галловая и феруловая кислоты, кверцетин и (+)-катехин. Переход от ранее использовавшегося мультипликативного индекса к равновзвешенной вероятностной оценке не изменил принципиально состав ведущих кандидатов, но устранил риск непропорционального усиления редких классов активности. Это повышает методическую прозрачность ранжирования и делает его более пригодным для последующего отбора соединений для независимой проверки.

Проверка чувствительности показала, что изменение способа формирования функциональных меток не приводит к радикальной перестройке верхней части рейтинга. Вместе с тем разделение соединений по структурным каркасам сопровождалось снижением усреднённой точности с 0,8041 до 0,6245, что указывает на ограниченную переносимость модели на химически более удалённые соединения. Следовательно, разработанная схема наиболее надёжна как инструмент внутренней приоритизации в пределах заданного химического пространства, а её применение к расширенным библиотекам пищевых молекул и к независимым наборам данных требует дополнительной валидации.

Концентрационные сведения о присутствии соединений в хлебной матрице в настоящей работе имели вспомогательное значение. Их покрытие оказалось недостаточным для включения в основной ранговый показатель: сопоставленные данные были доступны только для 4 из 43 соединений и не охватывали ведущие позиции рейтинга. Поэтому полученные модельные оценки не должны трактоваться как прямое свидетельство физиологической значимости соединений в составе готового пищевого продукта. Они отражают прежде всего структурно-фармакологический потенциал индивидуальных молекул по данным ChEMBL и задают направление для дальнейших экспериментальных исследований.

Таким образом, предложенный подход позволяет перейти от разрозненного описания отдельных пищевых биоактивных соединений к формализованной системе их вероятностной приоритизации. Научная значимость работы состоит в демонстрации возможности аккуратного применения методов хемоинформатики и машинного обучения к малому корпусу соединений, ассоциированных с хлебной матрицей, при условии строгой курации данных, сравнительной оценки моделей, анализа ошибок и явного указания границ

применимости результатов. Практическое значение исследования заключается в формировании обоснованного перечня соединений-кандидатов для последующей внешней, литературной и экспериментальной валидации. Дальнейшее развитие работы должно быть связано с расширением корпуса соединений, уточнением перечня оцениваемых биологических эффектов и критериев их отнесения к функциональным классам, включением данных о концентрациях, биодоступности и метаболических превращениях, а также с проверкой ведущих кандидатов в релевантных in vitro моделях и на независимых наборах данных.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / REFERENCES

1. Boudaoud, S., Sicard, D., Suc, L., Conéjéro, G., Segond, D., Aouf, C. (2021). Ferulic acid content variation from wheat to bread. *Food Science and Nutrition*, 9(5), 2446–2457. https://doi.org/10.1002/fsn3.2171
2. Boz, H. (2015). Ferulic acid in cereals — A review. *Czech Journal of Food Sciences*, 33(1), 1–7. https://doi.org/10.17221/401/2014-CJFS
3. Skrajda-Brdak, M., Konopka, I., Tańska, M., Czaplicki, S. (2019). Changes in the content of free phenolic acids and antioxidative capacity of wholemeal bread in relation to cereal species and fermentation type. *European Food Research and Technology*, 245, 2247–2256. https://doi.org/10.1007/s00217-019-03331-y
4. Abdel-Aal, E.-S.M., Rabalski, I. (2022). Changes in phenolic acids and antioxidant properties during baking of bread and muffin made from blends of hairless canary seed, wheat, and corn. *Antioxidants*, 11(6), Article 1059. https://doi.org/10.3390/antiox11061059
5. Dall'Asta, M., Bresciani, L., Calani, L., Cossu, M., Martini, D., Melegari, C. et al. (2016). In vitro bioaccessibility of phenolic acids from a commercial aleurone-enriched bread compared to a whole grain bread. *Nutrients*, 8(1), Article 42. https://doi.org/10.3390/nu8010042
6. Arya, S.S., Rookes, J.E., Cahill, D.M., Lenka, S.K. (2021). Vanillin: A review on the therapeutic prospects of a popular flavouring molecule. *Advances in Traditional Medicine*, 21(3), 1–17. https://doi.org/10.1007/s13596-020-00531-w
7. Viretto, C., Tlais, A.Z.A., Arora, K., Ameur, H., Tuccillo, F., Polo, A. et al. (2025). Unraveling the functional potential of microbial resources and pulse-based matrices for sourdough breadmaking. *Future Foods*, 11, Article 100643. https://doi.org/10.1016/j.fufo.2025.100643
8. Sanmartín, G., Sánchez-Adriá, I.E., Salvador, A., Prieto, J.A., Estruch, F., Randez-Gil, F. (2024). Quantitative assessment of volatile profile and sensory perception of artisan bread made in the city of Valencia. *Foods*, 13(23), Article 3872. https://doi.org/10.3390/foods13233872
9. Huang, C., Huang, J., Zhang, B., Omedi, J.O., Chen, C., Zhou, L. et al. (2023). Rheo-fermentation dough properties, bread-making quality and aroma characteristics of red bean (Vigna angularis) sourdough induced by LAB Weissella confusa QS813 strain fermentation. *Foods*, 12(3), Article 605. https://doi.org/10.3390/foods12030605
10. Mărgăoan, R., Cornea-Cipcigan, M., Topal, E., Kösoğlu, M. (2020). Impact of fermentation processes on the bioactive profile and health-promoting properties of bee bread, mead and honey vinegar. *Processes*, 8(9), Article 1081. https://doi.org/10.3390/pr8091081
11. Aghababaei, F., Hadidi, M. (2023). Recent advances in potential health benefits of quercetin. *Pharmaceuticals*, 16(7), Article 1020. https://doi.org/10.3390/ph16071020
12. Suchowilska, E., Bieńkowska, T., Stuper-Szablewska, K., Wiwart, M. (2020). Concentrations of phenolic acids, flavonoids and carotenoids and the antioxidant activity of the grain, flour and bran of Triticum polonicum as compared with three cultivated wheat species. *Agriculture*, 10(12), Article 591. https://doi.org/10.3390/agriculture10120591
13. Wang, M., Firrman, J., Liu, L., Yam, K. (2019). A review on flavonoid apigenin: Dietary intake, ADME, antimicrobial effects, and interactions with human gut microbiota. *BioMed Research International*, 2019, Article 7010467. https://doi.org/10.1155/2019/7010467
14. Kim, S.H., Park, J.G., Lee, J., Yang, W.S., Park, G.W., Kim, H.G. et al. (2015). The dietary flavonoid kaempferol mediates anti-inflammatory responses via the Src, Syk, IRAK1, and IRAK4 molecular targets. *Mediators of Inflammation*, 2015, Article 904142. https://doi.org/10.1155/2015/904142
15. Ruiz-Álvarez, B.E., Padilla-de la Rosa, J.D., González Avila, M.G., Sandoval, G., Desjardins, Y. (2025). Novel acylated naringin enhances propionate release and stimulates the growth of flavanone-metabolizing bacteria in an in vitro batch fermentation model. *Life*, 15(6), Article 967. https://doi.org/10.3390/life15060967
16. Tian, W., Chen, G., Tilley, M., Li, Y. (2021). Changes in phenolic profiles and antioxidant activities during the whole wheat bread-making process. *Food Chemistry*, 345, Article 128851. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128851
17. Yu, L., Beta, T. (2015). Identification and antioxidant properties of phenolic compounds during production of bread from purple wheat grains. *Molecules*, 20(9), 15525–15549. https://doi.org/10.3390/molecules200915525
18. Czajkowska-González, Y.A., Alvarez-Parrilla, E., Martínez-Ruiz, N.R., Vázquez-Flores, A.A., Gaytán-Martínez, M., de la Rosa, L.A. (2021). Addition of phenolic compounds to bread: Antioxidant benefits and impact on food structure and sensory characteristics. *Food Production, Processing and Nutrition*, 3, Article 25. https://doi.org/10.1186/s43014-021-00068-8
19. Liu, Y., Shi, L., Qiu, W., Shi, Y. (2022). Ferulic acid exhibits anti-inflammatory effects by inducing autophagy and blocking NLRP3 inflammasome activation. *Molecular and Cellular Toxicology*, 18(4), 509–519. https://doi.org/10.1007/s13273-021-00219-5
20. Goya-Jorge, E., Jorge Rodríguez, M.E., Sylla-Iyarreta Veitía, M., Giner, R.M. (2021). Plant occurring flavonoids as modulators of the aryl hydrocarbon receptor. *Molecules*, 26(8), Article 2315. https://doi.org/10.3390/molecules26082315
21. Jin, U.-H., Park, H., Li, X., Davidson, L.A., Allred, C., Patil, B. et al. (2018). Structure-dependent modulation of aryl hydrocarbon receptor-mediated activities by flavonoids. *Toxicological Sciences*, 164(1), 205–217. https://doi.org/10.1093/toxsci/kfy075
22. Zhang, S., Qin, C., Safe, S.H. (2003). Flavonoids as aryl hydrocarbon receptor agonists/antagonists: Effects of structure and cell context. *Environmental Health Perspectives*, 111(16), 1877–1882. https://doi.org/10.1289/ehp.6322
23. Zdrazil, B., Felix, E., Hunter, F., Manners, E.J., Blackshaw, J., Corbett, S. et al. (2024). The ChEMBL Database in 2023: A drug discovery platform spanning multiple bioactivity data types and time periods. *Nucleic Acids Research*, 52(D1), D1180-D1192. https://doi.org/10.1093/nar/gkad1004
24. Rogers, D., Hahn, M. (2010). Extended-connectivity fingerprints. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 50(5), 742–754. https://doi.org/10.1021/ci100050t
25. Mayr, A., Klambauer, G., Unterthiner, T., Steijaert, M., Wegner, J.K., Ceulemans, H. et al. (2018). Large-scale comparison of machine learning methods for drug target prediction on ChEMBL. *Chemical Science*, 9(24), 5441–5451. https://doi.org/10.1039/c8sc00148k
26. Varma, S., Simon, R. (2006). Bias in error estimation when using cross-validation for model selection. *BMC Bioinformatics*, 7, Article 91. https://doi.org/10.1186/1471-2105-7-91
27. Westerman, K.E., Harrington, S., Ordovas, J.M., Parnell, L.D. (2020). PhyteByte: Identification of foods containing compounds with specific pharmacological properties. *BMC Bioinformatics*, 21, Article 238. https://doi.org/10.1186/s12859-020-03582-7
28. Reker, D., Shi, Y., Kirtane, A.R., Hess, K., Zhong, G.J., Crane, E. et al. (2020). Machine learning uncovers food- and excipient-drug interactions. *Cell Reports*, 30(11), 3710–3716. https://doi.org/10.1016/j.celrep.2020.02.094
29. Sanchez-Ruiz, A., Colmenarejo, G. (2022). Systematic Analysis and Prediction of the Target Space of Bioactive Food Compounds: Filling the Chemobiological Gaps. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 62(16), 3734–3751. https://doi.org/10.1021/acs.jcim.2c00888
30. Periwal, V., Bassler, S., Andrejev, S., Gabrielli, N., Patil, K.R., Typas, A. et al. (2022). Bioactivity assessment of natural compounds using machine learning models trained on target similarity between drugs. *PLoS Computational Biology*, 18(4), Article e1010029. https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1010029
31. Kuznetsov, M., Chernyavskaya, O., Kutuzov, M., Vilkova, D., Novichenko, O., Stolyarova, A. et al. (2025). Development of a predictive model for the biological activity of food and microbial metabolites toward estrogen receptor alpha (erα) using machine learning. *Big Data and Cognitive Computing*, 9(4), Article 86. https://doi.org/10.3390/bdcc9040086
32. Kuznetsov, M., Klein, E., Velina, D., Mutallibzoda, S., Orlovtseva, O., Tefikova, S. et al. (2025). Using Machine learning for the discovery and development of multitarget flavonoid-based functional products in MASLD. *Molecules*, 30(21), Article 4159. https://doi.org/10.3390/molecules30214159
33. Breiman, L. (2001). Random forests. *Machine Learning*, 45(1), 5–32. https://doi.org/10.1023/A:1010933404324

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ	AUTHOR INFORMATION
Принадлежность к организации	**Affiliation**
Кузнецов Максим Александрович — аспирант, кафедра пищевых технологий и биоинженерии, Российский экономический университет имени Г. В. Плеханова 115054, Москва, Стремянный пер, 36 E-mail: 5726219@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0009-0003-2652-0303	**Maksim A. Kuznetsov**, PhD student, Research Laboratory «Biotechnology of Food Systems», Plekhanov Russian University of Economics 36, Stremyanny lane, 115054, Moscow, Russia E-mail: 5726219@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0009-0003-2652-0303
Никитин Игорь Алексеевич — доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой пищевых технологий и биоинженерии, Российский экономический университет имени Г. В. Плеханова 115054, Москва, Стремянный пер, 36 E-mail: Nikitin.IA@rea.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8988-5911 * автор для контактов	**Igor A. Nikitin**, Doctor of Technical Sciences, Docent, Head of the Department of Food Technology and Bioengineering, Plekhanov Russian University of Economics 36, Stremyanny lane, 115054, Moscow, Russia E-mail: Nikitin.IA@rea.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8988-5911 * corresponding author
Критерии авторства	**Contribution**
Авторы в равных долях имеют отношение к написанию рукописи и одинаково несут ответственность за плагиат.	Authors equally relevant to the writing of the manuscript, and equally responsible for plagiarism.
Конфликт интересов	**Conflict of interest**
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.	The authors declare that there is no conflict of interest.

DOI: https://doi.org/10.21323/2618-9771-2026-9-2-294-305

Received 03.01.2026
Accepted in revised 04.06.2026
Accepted for publication 08.06.2026
© Ekayoda O., Kadiri H. E., Apiamu A., Okpoghono J., 2026

Available online at https://www.fsjour.com/jour
Review article
Open access

NUTRITIONAL PROFILES OF *PERSEA AMERICANA* AND *TELFAIRIA OCCIDENTALIS* SEEDS: POTENTIAL APPLICATIONS IN FOOD FORMULATIONS

Ovigueroye Ekayoda[1]*, Helen E. Kadiri[1], Augustine Apiamu[1], Joel Okpoghono[2]

[1] Department of Biochemistry, Faculty of Science, Delta State University, Abraka, Delta State, Nigeria
[2] Department of Biochemistry, Faculty of Science, Southern Delta University, Ozoro, Delta State, Nigeria

KEYWORDS:
Edible seeds, functional food, health benefits, nutritional composition, Persea americana, Telfairia occidentalis

ABSTRACT

Underutilized plant seeds represent a valuable but often overlooked resource for improving food security, promoting sustainable agriculture, and expanding the availability of nutrient-dense ingredients. Avocado (*Persea americana*) and fluted pumpkin (*Telfairia occidentalis*) seeds have gained attention due to their health benefits and nutritional advantages. *P. americana* seeds are not agro-waste; rather, they are an excellent supplier of bioactive chemicals that may find use in the food and pharmaceutical industries. *T. occidentalis* seeds mostly re-cultivated for its consumable leaves are rich in antioxidants and other essential nutrients, serving functional roles and demonstrating diverse health-enhancing properties. This review investigates the nutritional profile of two underexploited seeds — *P. americana* seeds and *T. occidentalis* seeds — with emphasis on their nutritional composition, health benefits and approaches to emphasize their use as functional food components and their prospective incorporation into dietary supplements. To find pertinent research on the nutritional makeup of *P. americana* and *T. occidentalis* seeds, an organized search for literature was carried out across several web-based databases (Google Scholar, PubMed, ScienceDirect, Google Search Engine, Springer Link, and Web of Science). The seeds of *P. americana* and *T. occidentalis* exhibit a comparable nutritional profile which include macronutrient, mineral content, and phytochemical constituents that together provide their therapeutic benefits including antimicrobial, antioxidant, anti-obesity, anti-inflammatory, antidiabetic, anticancer, and enhancing fertility. Both seeds can be processed and effectively integrated into various food products, thereby improving their functional attributes. The review highlights the underutilized nutritional and functional potential of these seeds, providing scientific support for their incorporation into food formulations and value-added product development. Valorizing *T. occidentalis* and *P. americana* seeds could therefore contribute to waste reduction, economic diversification, and improved dietary quality, especially in regions where these crops are abundant.

Поступила 03.01.2026
Поступила после рецензирования 04.06.2026
Принята в печать 08.06.2026
© Экайода О., Кадири Х. Э., Апиаму А., Окпогоно Дж., 2026

https://www.fsjour.com/jour
Обзорная статья
Открытый доступ

ПРОФИЛИ ПИТАТЕЛЬНЫХ СВОЙСТВ СЕМЯН *PERSEA AMERICANA* И *TELFAIRIA OCCIDENTALIS*: ПОТЕНЦИАЛЬНЫЕ ВИДЫ ПРИМЕНЕНИЯ В СОСТАВЕ РЕЦЕПТУР ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ

Экайода О.[1]*, Кадири Х. Э.[1], Апиаму А.[1], Окпогоно Дж.[2]

[1] Кафедра биохимии, факультет естественных наук, Университет штата Дельта, Абрака, штат Дельта, Нигерия
[2] Кафедра биохимии, факультет естественных наук, Университет Южной Дельты, Озоро, штат Дельта, Нигерия

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:
съедобные семена, функциональные продукты, полезные свойства, состав питательных веществ, Persea americana, Telfairia occidentalis

АННОТАЦИЯ

Семена растений представляют собой ценный, но зачастую неиспользуемой ресурс, способный повысить продовольственную безопасность, развить устойчивую систему сельского хозяйства и увеличить потребительскую доступность ингредиентов, плотно насыщенных питательными веществами. Семя авокадо (*Persea americana*) и семена рифленой тыквы (*Telfairia occidentalis*) привлекли к себе внимание благодаря своим полезным для здоровья свойствам и питательной ценности. Семя *P. americana* не является сельскохозяйственным отходом; напротив, оно представляет собой отличный источник биологически активных веществ, которым можно найти применение в пищевой и фармацевтической промышленности. Семена *T. occidentalis*, в основном повторно культивируемые ради получения съедобных листьев, богаты антиоксидантами и другими необходимыми питательными веществами, выполняют функциональные задачи и обладают разнообразными свойствами, полезными для здоровья. В этой работе исследуется питательный профиль двух недооцененных семян — семян *P. americana* и семян *T. occidentalis* — с особым вниманием к их питательному составу, пользе для здоровья и подходам к их использованию в качестве функциональных пищевых компонентов, и перспективе их включения в пищевые добавки. Для поиска соответствующих исследований по питательному составу семян *P. americana* и *T. occidentalis* был проведен организованный поиск источников в нескольких веб-базах данных (Google Scholar, PubMed, ScienceDirect, Google Search Engine, Springer Link и Web of Science). Семена *P. americana* и *T. occidentalis* обладают сопоставимыми профилями питательных веществ, включающими макронутриенты, минералы и фитохимические компоненты, которые в совокупности обеспечивают их терапевтические свойства, включая антимикробное, антиоксидантное, антиадипозное, противовоспалительное, противодиабетическое, противораковое действие, а также повышение фертильности человека. Оба вида семян могут быть переработаны и эффективно интегрированы в различные пищевые продукты, тем самым улучшая функциональные свойства такового пищевого продукта. В статье подчеркивается недооцененность питательного и функционального

FOR CITATION: **Ekayoda, O., Kadiri, H. E., Apiamu, A., Okpoghono, J.** (2026). Nutritional profiles of *Persea americana* and *Telfairia occidentalis* seeds: Potential applications in food formulations. *Food Systems,* 9(2), 294–305. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2026-9-2-294-305

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: **Экайода, О., Кадири, Х.Э., Апиаму, А., Окпогоно, Дж.** (2026). Профили питательных свойств семян *Persea americana* и *Telfairia occidentalis*: потенциальные виды применения в составе рецептур пищевых продуктов. *Пищевые системы*, 9(2), 294–305. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2026-9-2-294-305

потенциала этих семян, дается научное обоснование для их включения в пищевые рецептуры и разработки продуктов питания с добавленной стоимостью. Таким образом, использование семян *T. occidentalis* и *P. americana* может способствовать сокращению объема отходов, диверсификации экономики и улучшению качества питания, особенно в регионах, где эти культуры широко произрастают.

1. Introduction

Edible seeds play a crucial role in human nutrition, offering a wide array of phytochemicals with various important biological functions, including antioxidant, antitumor anti-inflammatory, and antidiabetic effects [1–3]. Many phytochemicals may enhance the activity of enzymes that detoxify carcinogens and other harmful substances in the body [4,5]. There has been a growing demand for vegetables, fruits, seeds, and nuts extracts as essential components of the diets that supports prevention of disease condition [6–9]. This trend is driven by the rising prevalence of several diseases such as cancer, cognitive capacities decline, hypertension, malaria [10], diabetes, and oxidative stress condition [11,12]. These conditions could potentially be prevented or mitigated through modifications in dietary habits [13,14]. Avocado (*Persea americana*) is a tree that produces edible fruit, originating from Mexico and Central America, but now cultivated in various tropical regions. It belongs to the *Lauraceae* family of the flowering plants [15]. Recently, *P. americana* has gained recognition as a "superfood" due to its exceptional nutritional and phytochemical profile compared to other fruits [4]. The *P. americana* fruit is classified as a berry containing a single large seed. While the fruit's flesh is widely consumed for its nutritional benefits, the seed is typically discarded as an inedible part, thus resulting in substantial waste of the vegetative biomass. However, these seeds represent an affordable source of potential bioactive compounds that are currently underutilized [11]. Because of their poor flavor and processing challenges necessary to deploy their nutritional and functional benefits, *P. americana* seeds are always considered as waste despite their potential benefits. Research has shown that *P. americana* seeds possess a distinctive nutritional composition, containing significant amounts of proteins, complex carbohydrates, beneficial fats, vitamins, minerals, and phytochemicals [16,17]. In industrial processing, only the pulp of *P. americana* is used, while the skin and seeds are discarded. These byproducts are rich in phytochemicals, possess antioxidant potential and have medicinal applications [6,7]. The seed of *P. americana* features anti-inflammatory, antioxidant, antimicrobial, anti-diabetic, neuroprotective, and anti-carcinogenic properties [7,18]. Extracts from *P. americana* seeds offer pharmacological benefits in managing certain health conditions, such as hypertension, diabetes etc. [17].

Fluted pumpkin, scientifically known under the name *Telfairia occidentalis*, is a member of the *Cucurbitaceae* family, it thrives in tropical climates. This plant is primarily cultivated for its consumable leaves and seeds [19]. *T. occidentalis* is acknowledged for its high nutritional value, containing vital nutrients that contribute significantly to human dietary needs. The plant's seeds are particularly noteworthy, with a wide array of nutrients and bioactive components that potentially offer considerable health advantages. These seeds have been utilized in traditional cooking practices and folk remedies for long time [20]. *T. occidentalis* seeds are rich sources of various beneficial compounds including, antioxidants, essential amino acids, vitamins, proteins, phenolics, minerals, and other essential nutrients. These components not only serve regulatory and functional roles but also demonstrate diverse health-improving properties [21].

In recent years, there has been growing interest for the seeds of *P. americana* and *T. occidentalis* due to their potential health benefits and nutritional advantages. Although these plants are primarily cultivated for their edible fruits and leaves, respectively, the research has shown that their seeds contain a diverse range of nutrients and bioactive compounds that could significantly benefit human health and wellness. The nutritional profile and possible health advantages of these seeds are underscored within their potential as valuable assets in promoting nutrition and health. As global interest in viable and nutrition based in plants continues to expand, the exploration of underutilized plant components, such as these seeds, becomes increasingly important. This review, therefore, aims to provide an overview of the nutritional benefits of *P. americana* and *T. occidentalis* seeds, thus providing an insight for a complete analysis their potential contributions to human health and nutrition.

2. Methodology

The literature was chosen using the PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Review and Meta-Analyses) technique. Initially, for this review 758 scientific papers were found. After the preliminary analysis, 245 duplicate publications were removed from the array of the sources in order to eliminate repetitive material, because they were repeatedly found across numerous databases. Furthermore, 151 papers were excluded because they did not meet the eligibility and inclusion criteria and were irrelevant to the research topic. For a variety of reasons, including as being outside the designated field of study or having restricted access, additional 182 studies were excluded. A total of 180 studies advanced to the screening stage after their abstracts were reviewed. 42 of these studies were rejected because they did not meet the study's goals while 41 of the 138 remaining items were excluded after their relevance was assessed. In the end, 97 articles were reviewed. Figure 1 displays the PRISMA flow chart used to choose the literature sources.

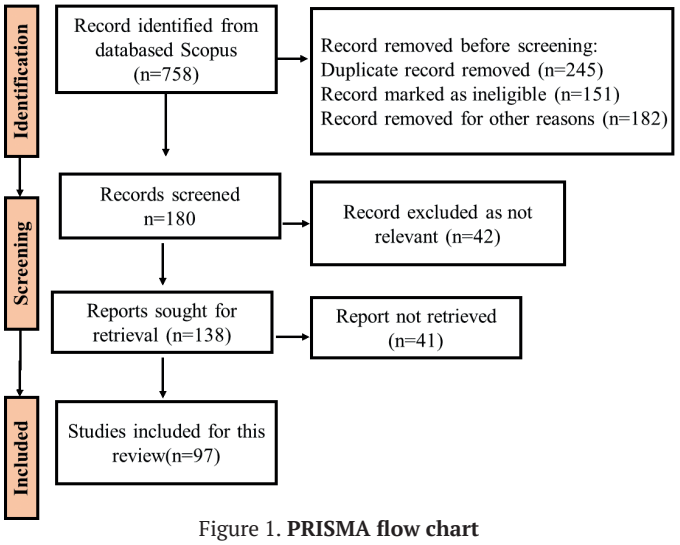


Figure 1. **PRISMA flow chart**
Рисунок 1. **Блок-схема (PRISMA)**

3. Nutritional composition

3.1. Nutritional composition of P. americana seeds

P. americana seeds boast a diverse nutritional composition, containing substantial quantities of both macro- and micronutrients, as well as phytochemicals. These seeds are acknowledged for their potential health advantages, which are ascribed to their versatile chemical composition. *P. americana* seeds serve as an excellent source of macronutrients, including carbohydrates, fats, and proteins, along with dietary fiber and bioactive compounds [17]. Carbohydrates are considered to comprise a substantial percentage of the macromolecules present in *P. americana* seeds as evidenced by several studies which reported carbohydrates content as high as 64.9 % [7], 44.7 % [22], 32.05 % [23]. Research by Báez-Magaña et al. [24] indicates that *P. americana* seed extract is rich in fatty acids. Their study quantified fatty acids profile comprised of arachidic (2.39 µg/g), behenic acid (3.63 µg/g), erucic (2.44 µg/g), linoleic (4.06 µg/g), myristic (2.49 µg/g), nervonic (2.88 µg/g), oleic (5.32 µg/g), palmitic (7.1 µg/g), tetracosanoic acid (4.29 µg/g), and stearic acid (5.06 µg/g) as well as their derivatives such as pahuatins (4.26 µg/g), persins (10.12 µg/g), polyhydroxy fatty acids (24.26 µg/g) and avocatins (32.28 µg/g). Additionally, fats content in *P. americana* seeds have been reported to be as high as 14.1 % [22] and 25.73 % [25]. Protein represents a major macromolecular component in *P. americana* seeds, with multiple studies reporting on its presence as 2.64 % [26], 7.75 % [27], 15.55 % [28], 17.94 % [29], and 23 % [22]. The approximate composition of *P. americana* seeds is also significant in their nutritional profile. Egbuonu et al. [26] demonstrated that the moisture content, dry matter, crude fibre and ash content available in *P. americana* seeds amount to 13.09 %, 86.91 %, 2.87 % and 3.82 % respectively. In addition, Okorie et al. [25] reported a relatively low moisture content of 8.98 % and ash content of 3.28 %.

P. americana seeds are a valuable source of various minerals and vitamins, including calcium, copper, phosphorus, lead, potassium, sodium, iron, zinc, cobalt, magnesium, and vitamins A, B (B1, B2, and B3), C, E, and K [7]. Due to their mineral content, these seeds are considered beneficial for both animal feed and human consumption to address micronutrients deficiencies. The availability of the vitamins such as E (an antioxidant), B complex (involved in energy metabolism), and K (essential for blood clotting) in *P. americana* seeds may boost immune system function.

P. americana seeds contain several nutrients based on available research and these nutrients are included into the general recommended daily intakes (RDIs). *P. americana* seeds contain about ~60–65 g carbohydrates (mostly starch), ~2–24 g protein content, a relatively low lipid content that includes healthy unsaturated fatty acids, and up to 50% of its dry weight is made up of dietary fiber [7]. Micronutrients such as calcium, potassium, phosphorus, magnesium are present at measurable amounts while iron, zinc, copper are present in trace amounts. Vitamins A, B1 (thiamine), B2 (riboflavin), B3 (niacin), C, E are present but typically lower than in the fruit flesh of *P. americana* [7]. Table 1 shows the comparison of nutrient presence in *P. americana* seeds to a typical adult person's RDIs (general nutrient needs). *P. americana* seed nutrients is comparable to other foods known for providing the same nutrient. *P. americana* seed outrun a lot of other seeds in fiber and antioxidants content, but feature lower protein/fat than oilseeds like almonds. Table 2 depicted the comparison of *P. americana* seed with other seeds/nuts nutrients per 100 g. Nutritional facts of chia seeds indicated that they possess high fiber content, rich in antioxidants and moderate level of protein [31,32] which is similar to *P. americana* seed. However, almond possesses higher protein and fat level (21 and 50 g per 100 g respectively), and low fiber content (12 g) [33,34] compared to *P. americana* seed. Antioxidants such as catechins and procyanidins are present in *P. americana* seed in high amounts [35]. However, there's no official RDI, but high intake of antioxidant is correlated with reduced risk of disease development. *P. americana* seed contains catechins similar to those in green tea but often in higher concentrations when calculated by weight. Additionally, the seed has significantly higher phenolic content than the edible pulp [17]. *P. americana* seed contains a mix of soluble and insoluble fiber, though exact numbers vary because a large portion of the seed is actually starch (carbohydrate), not just fiber. The fiber content is estimated to be 30–45 g per 100 g (dried/ground) while fiber RDI is 25–36 g per day. In comparison with oatmeal, a tablespoon of avocado seed powder has sufficient amount of soluble fiber, but a bowl of oatmeal (4 g fiber per cup) is a good source as its unique feature is its rich content of dietary fiber [36].

Table 1. **Approximate nutritional composition per 100 g (dried *P. americana* seed flour/powder)**

Таблица 1. **Приблизительный состав питательных веществ в 100 г. (мука/порошок из сушеных семян *P. Americana*)**

Nutrient	Amount per 100 g	% of adult RDA/RDI*
Energy	~350–400 kcal	~18–20% (2000 kcal diet)
Protein	12–18 g	24–36% (50 g RDA)
Total fat	13–19 g	Variable (mostly unsaturated)
Carbohydrates	48–58 g	High (mostly starch)
Dietary fiber	30–45 g	107–160% (28 g RDA women/34 g men)
Potassium	~800–1200 mg	17–26% (4700 mg AI)
Magnesium	~150–250 mg	36–60% (400 mg RDA men)
Calcium	~100–200 mg	10–20% (1000 mg RDA)
Phosphorus	~200–400 mg	29–57% (700 mg RDA)
Iron	~5–10 mg	28–56% (18 mg RDA women)
Zinc	~2–4 mg	18–36% (11 mg RDA men)

* RDA/RDI based on NIH/USDA for the adults (19–50 years; varies by sex), AI = Adequate Intake. Note: *P. americana* seeds are exceptionally high in phenolics/antioxidants (often > 2000 mg GAE/100g), thus far exceeding many seeds. Data are adopted from Bangar et al. [7], OASH [30].

Table 2. **Comparison of *P. americana* seed nutrient with almond and chia seed (per 100 g, approximate dry/roasted)**

Таблица 2. **Сравнение питательных свойств семян *P. Americana* с миндалем и семенами чиа (приблизительно на 100 г. сушеных/жареных семян)**

Nutrient (per 100 g)	*P. americana* seed	Almonds	Chia seed
Protein	12–18 g	21 g	17 g
Fat	13–19 g	50 g	31 g
Fiber	30–45 g	12 g	34 g
Magnesium	150–250 mg	~270 mg	335 mg
Zinc	2–4 mg	~3 mg	4.6 mg
Iron	5–10 mg	~4 mg	7.7 mg
Energy (kcal)	~350–400	~579	486

Data are adopted from Bangar et al. [7], Kulczyński et al. [31], Barreca et al. [34].

The seeds of *P. americana* contain high levels of bioactive phytochemicals, including alkaloids, flavonoids, saponins, tannins, oxalates, phytates, and phenolics [37]. Other significant phytochemicals found in these seeds are lycopene and phytosterols, which contribute to their antioxidant properties and their ability to protect body against oxidative stress and chronic diseases [25]. The composition of phytochemicals in *P. americana* seed reported by Setyawan et al. [16] include alkaloids (5.40 mg/100 g), tannins (0.76 mg/100 g), flavonoids (20.33 mg/100 g), oxalates (4.40 mg/100 g), saponins (0.52 mg/100 g), and phytates (0.44 mg/100 g). Additionally, Okorie et al. [25] stated that the seeds are rich in flavonoids (34.14 mg/100 g), phenols (3.51 mg/100 g), and beta-carotene (32.24 mg/100 g). Furthermore, Jimenez et al. [35] identified and quantified several polyphenols in *P. americana* seed which include catechin (24.3–2000 mg/100 g), caffeic acid (13.7–22.5 mg/100 g), chlorogenic acid (0.0516–1953 mg/100 g), (epi)catechin (1106–2906 mg/100 g), ferulic acid (0.09–1.2 mg/100 g), kaempferol (10.74 mg/100 g), kaempferide (10.74 mg/100 g), procyanidins (152–5560 mg/100 g), rutin (0.22 mg/100 g), trans-5-O-caffeoyl-D-quinic acid (163–574 mg/100 g) and vanillic acid (286 mg/100 g). Further polyphenol compounds discovered in *P. americana* seeds are 3-O-p-coumaroylquinic acid, 3-O-caffeoylquinic acid, procyanidin trimer A(I) and procyanidin trimer A(II). It's worth noting that diverse species of *P. americana* produce variable amounts of phenolic compounds and the phenolic compounds profile of the seed can be categorized into alkanols, flavonoids, glycosides, furan ring-containing derivatives, terpenoid and coumarin [16]. These bioactive compounds present in *P. americana* seed have demonstrated their various biological activities such as antioxidant and anti-inflammatory properties which enhance their potential as a nutraceutical [38]. Consequently, the considerable nutrient content of *P. americana* seeds could justify their use in human dietary supplements.

3.2. Nutritional composition of T. occidentalis seeds

T. occidentalis seeds are an important part of human diet since they are a substantial source of nutrients and bioactive substances. These seeds are especially well-known for their high fat and protein content, as well as their wide range of phytonutrients and essential amino acids [20]. Different processing techniques result in varying nutritional compositions for *T. occidentalis* seeds [39,40]. Protein content in both raw and roasted fluted pumpkin seeds ranges from 21.46 to 30.28%, lipid content from 37.25 to 38.13%, carbohydrate content ranging from 24.54 to 32.70%, ash content from 4.13 to 4.56%, moisture content from 0.27 to 0.86%, and crude fiber content from 2.06 to 2.49% [40]. According to another research, the protein level was as high as 29.15%, and the lipid content was similarly significantly high, with values of 35.62%, 35.62% fat, 28.40% carbohydrate, 4% ash, and 2.83% moisture [41]. *T. occidentalis* dried seeds contain moisture (1.40%), lipid (32.50%), protein (34.56%), ash (4.40%), fibre (15.71%) and carbohydrate (11.43%) [42]. The nutritional profile of fermented, roasted, and boiled samples of *T. occidentalis* seeds varied, according to Nzeagwu and Amadi [43]. They showed that the nutritional properties and functional qualities of the fermented and boiled samples of *T. occidentalis* seeds were superior. Mineral composition of fermented *T. occidentalis* seeds include iron (3.96 mg/100 g), zinc (2.68 mg/100 g), calcium (0.67 mg/100 g), magnesium (1.29 mg/100 g), copper (0.23 mg/100 g), selenium (0.16 mg/100 g), manganese (0.24 mg/100 g), iodine (0.12 mg/100 g), phosphorus (0.79 mg/100 g). Additionally, energy value and vitamin composition (vitamin C and vitamin E) of fermented *T. occidentalis* seeds was equal to 467.58 kcal, 0.55 mg/100 g and 0.43 mg/100 g respectively [43].

Arginine (0.37 mg/100g), aspartic acid (0.15 mg/100 g), cystine (4.44 mg/100 g), lysine (0.3 mg/100 g), leucine (0.21 mg/100 g), and methionine (3.7 mg/100 g) are among the amino acids found in *T. occidentalis* seed powder [41]. The seeds of *T. occidentalis* include both saturated and unsaturated fatty acids, with neutral lipid, glycolipid, and phospholipid contents of 16, 26, and 58%, respectively. Oleic acid is the most prevalent fatty acid, making up around 36% [44]. Compounds like pentadecanoic acid, hexadecanoic acid, pentanoic acid, dodecanoic acid, linoleic acid, palmitoleic acid, elaidic acid, and benzoic acid were found in the seeds [44]. These compounds help with a range of biological functions, including hepatoprotective, antioxidant, antimicrobial, anti-inflammatory, anticancer, and haematological functions of a body. The high nutritional value of *T. occidentalis* seeds is attributed to their high unsaturated fatty acid content [44]. The pharmacological activities of *T. occidentalis* seeds are influenced by a number of phytochemicals, including polyphenols, flavonoids, and tannins, based on phytochemical examination of the powdered seeds. According to Ouattara et al. [41], the phytochemical composition of *T. occidentalis* seeds included alkaloids (1.1 mg/100 g), flavonoids (8.32 mg/100 g), tannins (165.09 mg/100 g), phytates (49.39 mg/100 g), oxalates (43.5 mg/100 g) and polyphenols (272.68 mg/100 g). Thus, *T. occidentalis* seeds varied range of nutrients improves their usage as food.

T. occidentalis seeds are excellent sources of several nutrients such as protein, magnesium, phosphorus, iron, zinc, and healthy fats, making them nutrient-dense foods capable of contributing substantially to daily nutrients intake requirements. Nutritional composition showing how *T. occidentalis* contribute to Recommended Daily Intakes and how they compare with other well-known nutrient-rich foods are presented in the Table 3 and 4 respectively. *T. occidentalis* seeds nutrient composition for protein content is equal to ~25–35 g per 100 g with RDI of ~50 g, fat is ~40–50 g per 100 g (RDI of 44–77 g), iron (~8–15 mg per 100 g with RDI of 8 and 18 mg for men and women respectively), dietary fibre is 5–6 g per 100 g with RDI of 25–28 g (Table 3). Pumpkin seed (*Cucurbita* sp.) are significantly rich sources of proteins, fats and minerals [45]. *Cucurbita* sp seeds contain lipids (37.8–45.4 %), fiber (3–6 %), and proteins (25.2–37.0 %) [46] which is similar to *T. occidentalis* seeds nutritional content. Additionally, sunflower seeds are also very nutritive with higher proteins and lipids content of 33.85 % and 65.42 % respectively [47]. Soybeans contain about 37 % protein, 28 % fat and 5 % fibre [48]. *T. occidentalis* seeds stand out for higher content of protein compared to chia seeds, while being similar to sunflower in fat content as shown in the Table 4.

Table 3. **Nutritional composition of *T. occidentalis* seeds per 100 g (dry/roasted seeds)**

Таблица 3. **Состав питательных веществ в семенах *T. occidentalis*, на 100 г. (сушеные/жареные семена)**

Nutrient	Amount per 100 g	% of Adult RDA/RDI*
Energy	550–612 kcal	~28–31 % (2000 kcal diet)
Protein	30–33 g	60–66 % (50 g RDA)
Total fat	46–49 g	65–75 % (70 g RDA)
Carbohydrates	4–15 g	22–30 % (27 g RDA)
Dietary fiber	5–6 g	18–24 % (25–28 g RDA)
Magnesium	~500–592 mg	120–148 % (400 mg RDA)
Phosphorus	~1200 mg	~170 % (700 mg RDA)
Potassium	~800–900 mg	17–19 % (4700 mg AI)
Zinc	~10–15 mg	91–136 % (11 mg RDA men)
Iron	~8–15 mg	44–83 % (18 mg RDA women)
Calcium	~200–250 mg	20–25 % (1000 mg RDA)

* RDA/RDI based on NIH/USDA for adults (19–50 years; values vary by sex/age). Data are adopted from Ouattara et al. [41], Nzeagwu & Amadi [43], OASH [30].

Table 4. **Comparison of *T. occidentalis* seeds with other seeds (per 100 g, approximate)**

Таблица 4. **Сравнение свойств семян *T. occidentalis* с другими семенами (приблизительно, на 100 г.)**

Nutrient (per 100g)	*T. occidentalis* (Fluted Pumpkin)	*Cucurbita* sp (Common Pumpkin)	Sun-flower	Chia	Soybean
Energy (kcal)	~580	~559	~584	486	~447
Protein	30–33 g	30 g	17–21 g	17 g	43 g
Fat	46–49 g	49 g	51 g	31 g	22 g
Fiber	5–6 g	6–18 g	9–11 g	34 g	18 g
Magnesium	500–600 mg	~535 mg	~325 mg	335 mg	~228 mg
Zinc	10–15 mg	~7–10 mg	~5 mg	4.6 mg	~4.9 mg
Iron	8–15 mg	~8–9 mg	~5 mg	7.7 mg	~16 mg

Data are adopted from Kulczyński et al. [31], Ouattara et al. [41], Nzeagwu & Amadi [43], Batool et al. [45], Petraru et al. [47], Aanchal [48].

3.3. Anti-nutritional factors in P. americana and T. occidentalis seeds

Plants produce biologically active secondary metabolites known as anti-nutritional factors as a defense mechanism against the animal seedeaters and for survival in harsh conditions. These compounds can negatively impact the nutritional value of food by interfering with nutrient absorption and reducing bioavailability of the nutrients [49]. Various heat-stable and heat-labile anti-nutritional factors with toxic potential have been identified in foods, including saponins, cardiac glycosides, tannins, gossypol, phytic acid, alkaloids, protease inhibitors, lectins, amylase inhibitors, goitrogens, metal binding ingredients, and antivitamin factors. These substances, found in plant seeds, can lead to nutrition-related issues and adverse health effects [50]. High concentrations of anti-nutrients in the diet may cause toxicity, thus motivating the efforts to reduce their content in foods. Traditional and technological processing methods such as soaking, cooking, milling, roasting, de branning and fermentation have been used to decrease anti-nutritional components in foods [50]. Researchers have shown significant interest in anti-nutritional factors due to their potential beneficial biological activities for humans [51].

P. americana seeds contain anti-nutritional factors like saponins, alkaloids, tannins, and cyanogenic glycosides that can affect their nutritional value by interfering with nutrient absorption and digestion [26,37]. These compounds have various physiological effects and may be toxic if consumed in large quantities [26]. Most of these components can be eliminated through culinary processing techniques such as drying, soaking, cooking, fermentation and roasting. While studies of the effects provided to the human's health with the antinutrients in *P. americana* seeds are still lacking, studies on the animals using *P. americana* seed ethanol extract have shown no genotoxic effects, suggesting its potential use in cosmetic, food, or pharmaceutical application [17].

T. occidentalis seeds have been found to contain anti-nutritional compounds such as phytates, oxalates, tannins, and cyanogenic compounds, which can hinder nutrients absorption and digestion [41]. The significant anti-nutrient composition of *T. occidentalis* seed powder could decrease nutrients bioavailability and potentially cause adverse effects if consumed over an extended period [20]. However, anti-nutritional factors in *T. occidentalis* seeds can be reduced through processing like fermentation, boiling, steaming, and roasting [40]. Unripe *T. occidentalis* seeds are nutritionally preferable as food due to their lower anti-nutrient content and sweeter taste compared to the mature seeds [44].

4. Potential health benefits of *P. americana* and *T. occidentalis* seeds

4.1. Health benefits of P. americana seeds

Research has explored the potential health advantages of *P. americana* seeds, particularly in relation to diabetes, digestive health, cancer, liver protection, and weight management [4,52,53]. These seeds contain various bioactive compounds that contribute to their antioxidant and anti-inflammatory properties, which are responsible for their therapeutic effects [7]. The antioxidant potential of *P. americana* seeds is proved by their ability to stabilize free radicals produced by oxidative stress, which are associated with various disease conditions. Moreover, these seeds exhibit anti-inflammatory properties by reducing the excessive release of inflammatory mediators linked to the health conditions such as atherosclerosis, diabetes, tumor growth, and immunological illnesses [7]. Studies have shown that *P. americana* seed extract decreases the secretion of interleukins and tumor necrosis factor (TNF)-α in lipopolysaccharide-stimulated RAW264.7 cells. Aqueous extracts of *P. americana* seeds have demonstrated anti-inflammatory properties, particularly in the models of cadmium-induced nephrotoxicity, reducing levels of inflammatory markers like interleukin-2 [54]. The seeds' extracts also showed potential in reducing inflammation associated with liver cancer via enhancing apoptotic activities in affected tissues [53].

The anti-cancer potential of *P. americana* seeds and their biologically active components has been observed in human and animal cell lines, including those of lung, colon, breast, prostate, and hepatocellular carcinoma [55,56]. Polyphenols extracted from *P. americana* seeds have been found to inhibit various cancer cells, with inhibition rates of 19, 19.1, 67.6, and 132.2 μg/mL for prostate, breast, lung, and colon cancer cells, respectively, in a dose-dependent manner [56]. Avocatin B, a mixture of avocadene and avocadyne identified in *P. americana* seeds, has shown potent anticancer activity by selectively targeting and eliminating leukemia stem cells [18].

P. americana seeds have been reported to have diabetes-preventing and cholesterol-regulating properties [4]. The antidiabetic activity of *P. americana* seeds aqueous extract has been linked to the triggering of the PI3K/AkT pathway and inhibition of β-cell death, which may be the principal mechanism by which it enhances insulin sensitivity and controls glycolipid metabolism, thus ensuring a beneficial effect on diabetic conditions [57]. Additionally, Makasa [58] reported that crude extracts of *P. americana* seeds provided positive changes in both biochemical and hematological indices in diabetic rats, thus proving their potential use in diabetes management. The *P. americana* seed extract also exhibited hypoglycemic and antihyperglycemic effects by significantly lowering blood glucose levels in rats, this way highlighting its potential in the treatment of *diabetes mellitus*.

In cases of acetaminophen-induced liver damage, *P. americana* seed extracts have shown hepatoprotective effects. These extracts aid in restoring liver function and architecture, with the potential to reverse disruptions in liver integrity and function, and reestablish balance in the endogenous antioxidant system, comparable to the effects of silymarin, a well-known liver-protective agent [59]. The antioxidant properties of the seeds contribute to their ability to mitigate liver damage and improve overall liver health.

The substantial phenolic content in *P. americana* seeds is thought to contribute to their anti-obesity properties. Research on rats with obesity induced by high-fat diets showed that *P. americana* seed powder significantly decreased weight gain and enhanced lipid profiles, indicating its potential as an anti-obesity supplement [60]. *P. americana* seeds' flavonoids and saponins have been connected to the inhibition of inflammatory pathways that contribute to the development of obesity and its related comorbidities. These compounds could be the cause of the observed weight-reducing effects of *P. americana* seed powder [60]. In rats given a high-fat/high-fructose diet, *P. americana* oil has been shown to improve mitochondrial activity and lower levels of reactive oxygen species, pro-inflammatory markers, and lipid peroxidation, thereby alleviating down the non-alcoholic fatty liver disease, hyperglycemia, and dyslipidemia [61].

P. americana seeds demonstrate antimicrobial efficacy against bacteria, fungi, and parasites, suggesting their potential use in fighting infections and promoting overall gut health [7]. The antimicrobial efficiency of *P. americana* seed extracts is attributed to the various biologically active compounds available in the seeds. As antimicrobial resistance increases and synthetic drugs become less effective and more toxic, there is a growing interest for the alternative biologically active substances [11]. The seeds have antibacterial qualities, especially against the bacterium *Helicobacter pylori*, which is connected to stomach disorders. By preventing *H. pylori* growth, the bioactive substances in the seeds — such as phenolic and lipophilic compounds — may lower the incidence of stomach ulcers and associated disorders [62]. Additionally, petroleum ether extracts of the seeds showed inhibitory efficacy against *S. aureus*, and the seed extracts in methanol and chloroform had antifungal properties against *Cryptococcus neoformans* [63]. Jiménez-Arellanes et al. [64] reported anti-parasitic activity of the seeds against *E. histolytica* and *G. lamblia*. Research indicates that various *P. americana* seed extracts inhibit the growth of several microbial strains [11].

Restoring acetylcholine by blocking acetylcholinesterase (AChE) and butyrylcholinesterase (BChE) is how *P. americana* seeds are used in treating neurodegenerative diseases because Alzheimer's patients' brain impulse transmission may be hindered by low acetylcholine levels [7]. *P. americana* seed aqueous extracts was reported to have IC_{50} values of 27.93 and 30.08 mg/mL, respectively, for inhibiting the AChE and BChE enzymes [65]. By blocking these enzymes, phenolic substances like the caffeic acid found in *P. americana* seeds prevent butyrylcholine and acetylcholine from being broken down in brain neurons, which raises the amounts of both neurotransmitters at the synaptic clefts. As a result, nerve cell communication is eventually enhanced, and neurodegenerative diseases like Alzheimer's disease are better managed [7].

4.2. Health benefits of T. occidentalis seeds

The seeds of *T. occidentalis* provide numerous health advantages due to their nutritional and phytochemical content, making them a beneficial addition to health-promoting and disease-preventing diets [20]. These seeds are utilized for their medicinal properties, including antioxidant, antinociceptive, anti-inflammatory, anti-diabetic, anti-cholesterol, reproductive, hepatoprotective, and various other effects.

T. occidentalis seeds have shown considerable antioxidant capabilities, containing various phytochemicals such as flavonoids, tannins, and phenolic compounds. These components enable the seeds to neutralize free radicals, thereby preventing oxidative harm within the body and lowering the risk of chronic illnesses [66]. Extracts from these seeds display notable free radical scavenging ability and reducing power, thus suggesting their potential as a natural source of antioxidants [21]. Additionally, they have anti-inflammatory qualities that could help treat illnesses linked to inflammation. In experimental models, the seeds also show antinociceptive qualities, which lessen pain, supporting its historic usage to treat convulsions and pain. The phytochemicals in these seeds may inhibit the release of vasoactive substances and prostaglandins, potentially reducing inflammation [21].

Research on diabetic rat models has demonstrated that boiled *T. occidentalis* seeds can significantly decrease blood glucose levels, dyslipidemia, hyperglycemia and diabetic hepatocellular damage in alloxan-induced diabetes in rats, indicating their potential as an affordable alternative treatment for diabetes [67]. Additionally, peptide hydrolysate derived from *T. occidentalis* seed protein reduced fasting serum glucose and improved insulin levels in streptozotocin-induced diabetic rats [68]. *T. occidentalis* seeds assist in regulating blood glucose levels due to their hypoglycemic properties, making them valuable for diabetes management [69].

T. occidentalis seeds contain antioxidants that protect the heart from oxidative damage. Their high levels of beneficial fats, particularly unsaturated fatty acids, can contribute to lowering cholesterol and decreasing heart disease risk, thus supporting cardiovascular system health. Research by Onuegbu et al. [70] demonstrated that *T. occidentalis* seeds significantly reduced lipid profiles in Wistar rats, suggesting potential use in managing dyslipidemia. Additionally, Daramola et al. [71] found that the methanol extract of *T. occidentalis* seeds lowered serum cholesterol levels, potentially reducing risk of cardiovascular system disease.

Studies show that *T. occidentalis* exhibits anticancer properties by mitigating oxidative stress and suppressing cancer cell growth [44]. The seed's crude extract demonstrated anticancer activity by notably inhibiting oxidative burst in whole blood, isolated polymorphonuclear cells, and mononuclear cells [72]. The presence of compounds such as hexadecanoic acid, octadecatrienoic acid, eicosatrienoic acid, monoterpenes like phellandrene and borneol, and unsaturated fatty acids may contribute to the seed extract's anticancer effects. The anticancer mechanism involves interfering with cell division processes [72].

Traditional uses of *T. occidentalis* seeds suggest potential human reproductive system health benefits, as they are commonly used to enhance fertility [73]. These seeds contain essential nutrients that may improve sperm quality and reproductive health [74]. Njoku and Abarikwu [73] reported that *T. occidentalis* seed can alter male gonadal functions. Their study showed that diets supplemented with these seeds decreased steroidogenic enzyme activity, serum and intratesticular testosterone concentrations, and sperm quality parameters, including count, motility, viability, and normal morphology. Boiled *T. occidentalis* seed-supplemented diets exhibited protection against spermatotoxic effects and altered testosterone profiles in rats. The seeds' ability to induce these changes in sperm quality is attributed to compounds like saponins and alkaloids, which possess anti-infertility properties. Furthermore, Ademiluyi et al. [75] noted the use of *T. occidentalis* seeds in managing erectile dysfunction, as the seeds demonstrated anti-infertility effects in rats by reversing testicular injury and improving testosterone levels, testicular weight, sperm count, and motility.

5. Comparison of nutritional benefits

The primary objective of comparing the nutritional profiles of *P. americana* (Lauraceae family) and *T. occidentalis* (Cucurbitaceae family) despite their distinct botanical families is to promote the valorization of underutilized agro-industrial by-products and highlight their potential application as sustainable, nutrient-dense food ingredients. Additionally, the comparison evaluates and contextualize the nutritional potential of the underutilized *P. americana* seed against a well-established, edible indigenous *T. occidentalis* seed in order to assess its possible relevance for food, livestock feed, or nutraceutical applications. *P. americana* seeds comprise 13–17 % of the fruit weight and are discarded as waste, and *T. occidentalis* seeds are the by-products in regions where the leaves are primarily consumed. Both seeds possess complementary nutritional advantages: *T. occidentalis* seeds contain high amount of protein (30–33 %), fat (46–49 %), and minerals like magnesium and zinc while *P. americana* seeds stand out for exceptional amount of dietary fiber (30–45 %), moderate protein amount, and high antioxidant phenolic content. This comparison demonstrates how blending or co-using of these unrelated seeds can yield balanced composite flours with improved macronutrient ratios, enhanced essential amino acid scores, and superior functional properties (e.g., for gluten-free products, weaning foods, or food supplements). Studies have directly compared them in formulated diets to evaluate amino acid, proximate, and mineral compositions, showing their potential for addressing protein-and-energy malnutrition, reducing waste, and supporting circular economy principles in tropical horticulture [76,77]. Botanical family differences are irrelevant here, as the attention is focused on functional nutrition and sustainability, rather than taxonomic relatedness. This approach aligns with broader efforts to upcycle diverse underutilized seeds for ensuring food security and health benefits.

5.1. Similarities between P. americana and T. occidentalis seeds

Although the seeds of *P. americana* and *T. occidentalis* belong to different plant families and have different tastes and textures, they have a number of shared nutritional and therapeutic advantages. Both seeds are comparable in a number of ways, including their nutritional makeup, prospective applications, and health advantages. Nutrient-rich composition such as health beneficial lipids (unsaturated fats), protein, carbohydrates, fiber, vitamins, and minerals is all abundant in both seeds [17,41]. Additionally, both seeds are rich in bioactive phytochemicals, such as flavonoids, phenolics, and alkaloid, which make them excellent sources of antioxidants that shield the body from oxidative damage [25,41]. Due to their nutritional and phytochemical composition, which supports their anti-inflammatory and antioxidant qualities and gives them therapeutic effects, both seeds also offer a range of health benefits. They are used for their medical qualities, which include hepatoprotective,

anti-inflammatory, anti-diabetic, anti-cholesterol, anti-cancer, and antioxidant qualities. As such, they are a good supplement to diets that support health and prevent disease [7,20]. Anti-nutrients such as tannins, phytates, and saponins are found in both seeds which can prevent some minerals from being absorbed. To minimize anti-nutrients content levels and optimize the advantages of both seeds, proper preparation techniques like soaking, boiling, roasting, or fermenting are essential [26,40]. Both seeds can be used in soups, ground into a powder and used as flour in food products, or undergo oil extraction among other uses [17,20].

5.2. Unique benefits of each seed type

Both *P. americana* and *T. occidentalis* seeds provide significant health advantages, they exhibit disparities in their nutritional profiles, applications, and therapeutic properties, which collectively offer a diverse array of distinct benefits that enhance nutrition and overall health. Table 5 highlights the differences in nutritional profiles and therapeutic benefits of both seeds. *P. americana* seeds are characterized by elevated concentrations of polyphenols, flavonoids, and tannins, which substantiate their potent antioxidant properties [17]. These seeds also contain a moderate amount of protein and a high level of dietary fiber, which are beneficial for gastrointestinal health and serve as prebiotic agents [7]. The using of *P. americana* seed powder and extracts spans across various culinary applications, as the seed extracts are used in beverages as antioxidant-rich teas, while the seed powder is involved in the formulation of breads, cakes, and cookies [7]. *P. americana* seeds exhibit distinctive medicinal properties, including antimicrobial, anti-diabetic, and anti-inflammatory effects and are attributable to the health beneficial plants due to their substantial phytochemicals content [7]. Figure 2 displayed the health benefits of *P. americana* seed extract which includes neuroprotective, anti-microbial, anti-inflammatory, antioxidant, anti-cancer and antidiabetic activity.

Table 5. **Comparison of nutritional profiles and therapeutic benefits of *P. americana* and *T. occidentalis* seeds**

Таблица 5. **Сравнение профилей питательных и терапевтически полезных свойств семян *P. americana* и *T. occidentalis***

Nutritional profile/therapeutic properties	*P. americana* seeds	*T. occidentalis* seeds
Protein	Moderate amount	Higher content
Dietary fibre	High level	Moderate content
Lipids	Moderate	Higher content
Phytochemicals	Higher constituent	Moderate constituent
Medicinal properties	Antioxidant antimicrobial, and anti-inflammatory effects	Antinociceptive, antioxidant, anti-inflammatory, and fertility enhancement effects

Source: Elaboration by Osukoya et al. [21], Marra et al. [53], Ademiluyi et al. [75], Ekayoda et al. [76].

T. occidentalis seeds are distinguished by their high protein content and prevalence of unsaturated fatty acids, along with moderate dietary fiber and phytochemical components [41]. The seeds are amenable to multiple preparation methods, including roasting, fermentation, boiling, and consumption in their entirety, or milling into flour for using in soups, stews, and baked food [20]. *T. occidentalis* seeds are acknowledged for their unique health-promoting properties as depicted in the Figure 3 such as antinociceptive effects, antioxidant, anti-inflammatory property, free radical scavenging potential, enhancement of human fertility [21,73], and support for cardiovascular system health due to their abundant healthy unsaturated fats and free radical scavenging potential [71].

P. americana seeds exhibit a higher concentration of antioxidants and fiber, primarily acknowledged for their digestive and anti-inflammatory advantages, while *T. occidentalis* seeds feature superior levels of protein, essential fatty acids, and minerals, rendering them particularly beneficial for cardiovascular system protection, human fertility enhancement, and energy augmentation. Both seeds are nutritionally beneficial; however, difference in their health-related applications is based on their specific intrinsic properties.

6. Effects of varieties on nutritional and nutraceutical properties

6.1. Effects of P. americana varieties on nutritional and nutraceutical properties

P. americana encompasses over 500 cultivars worldwide, classified into three ecological races: Mexican (*P. americana* var. drymifolia), Guatemalan (*P. americana* var. guatemalensis), and West Indian (*P. americana* var. americana) [78]. The most notable varieties include Hass, Fuerte, Zutano, Bacon, Reed, Ettinger, and Maluma Hass. These varieties exhibit significant differences in nutritional composition (e.g., lipids, proteins, minerals content) and nutraceutical properties (e.g., antioxidants, phenolics, bioactive substances content), influenced by variety genetic factors, environmental conditions (soil, climate, altitude above the sea level), and stages of ripeness [79]. Commercial cultivars like Hass dominate over the global markets due to high oil content and long shelf life, but regional or lesser-known varieties often surpass them in specific nutrients or bioactive substances, offering untapped potential for functional foods, supplements, and pharmaceuticals [4,80]. These variations can affect health benefits, such as cardiovascular system protection, anti-inflammatory effects, and antioxidant capacity, making cultivar selection critical for the specific targeted applications. Although *P. americana* shows a great deal of variety among its cultivars, most of this diversity is still unexplored, particularly in terms of its nutritional profiles and functional qualities. Recent research has shown that various avocado cultivars and plant parts, such as pulp, leaves and seeds, vary significantly in their phytochemical profiles, antioxidant capabilities, and mineral contents [81].

P. americana varieties differ significantly in nutritional elements density and nutraceutical potency, driven by type of the variety, maturation ripeness stage, and region. According to Nasri et al. [82], eight Moroccan cultivars (Ettinger, Fuerte, Hass, Reed, Zutano, Bacon, Maluma Hass, Choquette) showed variations in the major lipid, and mineral profiles. They reported that Ettinger variety had the highest lipid (30.44 g/100 g) and energy (316.8 kcal/100 g) content, while Maluma Hass had high moisture (84.71 g/100 g) but low lipid (8.41 g/100 g) content. Protein ranged within 5.78–8.61 g/100 g (the highest was found in Bacon variety), carbohydrates varied with 5.63–14.61 g/100 g (the highest was found in Fuerte). Lipids were monounsaturated-dominant (76.89–84.7 g/100 g fatty acids), with oleic acid 50.38–71.49 g/100 g content (the highest was found in Zutano). Phytosterols totaled 2818.86–5401.36 mg/kg (highest

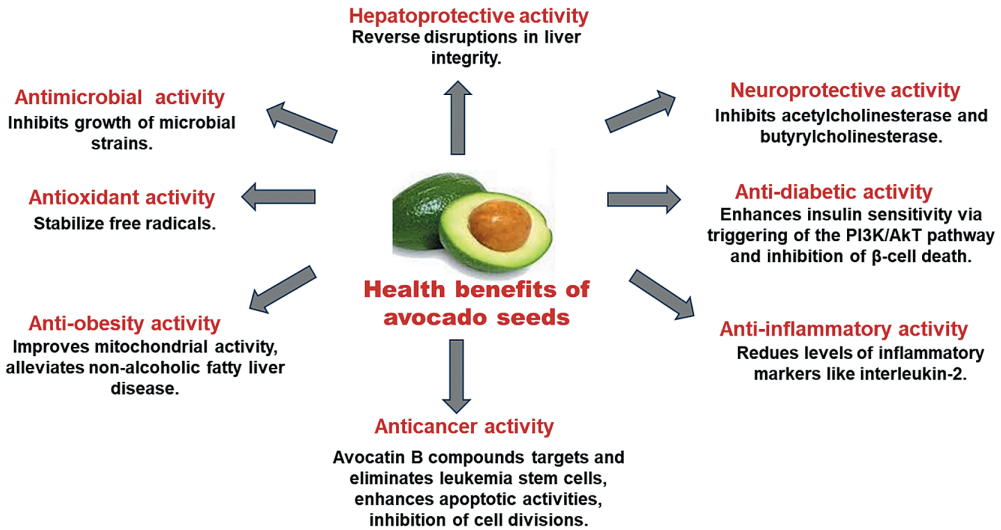


Figure 2. **Health benefits of avocado seeds (*P. americana*)**

Рисунок 2. **Полезные свойства семян авокадо (*P. americana*)**

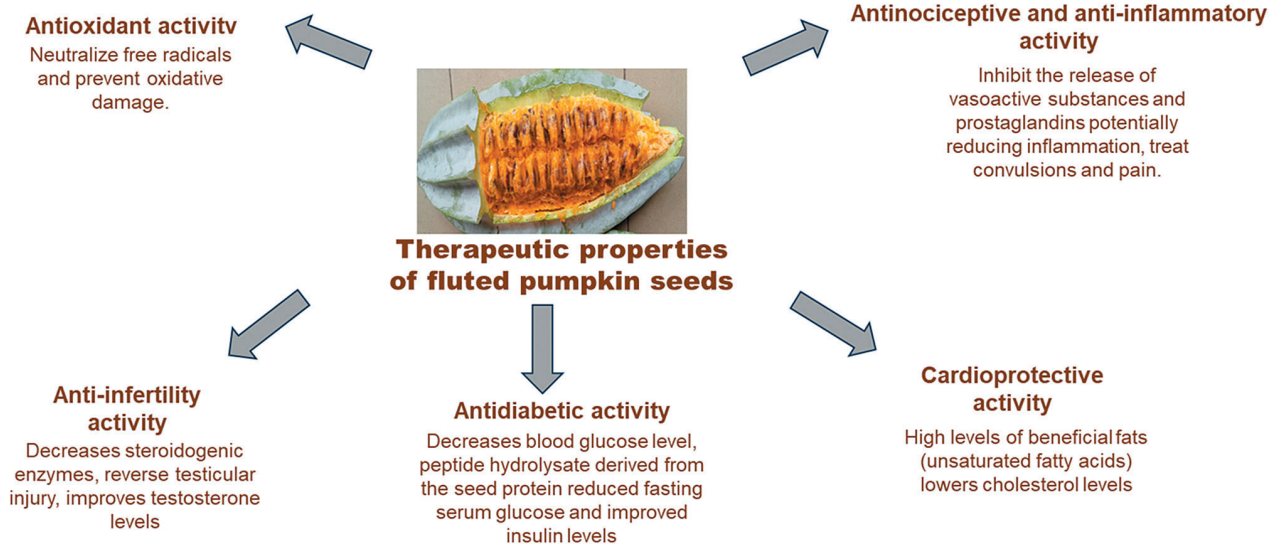


Figure 3. **Therapeutic properties of fluted pumpkin seeds (*T. occidentalis*)**
Рисунок 3. **Терапевтические свойства семян рифленой тыквы (*T. occidentalis*)**

in Choquette), tocopherols accounted for 77.22–332.18 mg/kg (the highest was found in Fuerte). Minerals varied: calcium 295.95–531.67 mg/kg (the highest was found in Ettinger), magnesium 246.29–339.84 mg/kg content (the highest was found in Reed), iron 8.5–20.32 mg/kg (the highest was found in Hass). Three Brazilian cultivars (Margarida, Breda, and Geada) were examined by de Oliveira et al. [83], who found that the peel, seed, and pulp had unique phytochemical profiles that were strongly correlated with antioxidant capability. The Breda cultivar, in particular, had the greatest total phenolic content in the seed (83.38 mg GAE/g), this way proving its potential for the production of useful ingredients. Similarly, a compositional analysis of the Hass variety was carried out by Ford et al. [84], confirming its constant nutritional profile and highlighting its position as a global standard.

Nutraceutically, antioxidants and bioactive substances (phenolics, carotenoids, acetogenins) are higher in the fruit by-products (peel, seeds) than in a pulp, with overripe fruits boosting content of phenolics. Regional Madeira varieties (e.g., thin purple skin) outperformed Hass in antioxidants and lipids content, with unique arachidonic acid and superior peel extracts for radical scavenging [80]. Hass (Guatemalan) is rich in procyanidins and catechins, Fuerte (Mexican) is rich in tocopherols, while West Indian hybrids like Shepard show lower content in some element assays. These support cardiovascular system (cholesterol-lowering via phytosterols), provide antidiabetic (glycemic control via consumption of fiber/ Monounsaturated Fatty Acids), and anticancer (due to cell apoptosis via seed extracts activity) benefits [85].

6.2. Effects of T. occidentalis Varieties on Nutritional and Nutraceutical Properties

T. occidentalis exhibits considerable varietal diversity, expressed through differences in seed size, seed coat color, oil yield, growth habit, and biochemical composition. These varietal differences arise from genetic variations, agro-ecological conditions, and cultivation practices, and they significantly affect the nutritional and nutraceutical quality of the plant, particularly its seeds and leaves [86]. The nutritional and nutraceutical properties of *T. occidentalis* are influenced heavily by two biological factors: the sex of the plant (male vs. female) and the morphotype (broad leaves vs. narrow leaves). Unlike *P. americana* which have standardized commercial names (e.g., Hass, Ettinger, Fuerte), *T. occidentalis* varieties are typically categorized by these physical and biological traits in the local agriculture. *T. occidentalis* cultivars can be identified by their seed color, vine thickness, leaf size, growth vigor, number of days before flowering, and succulence. *Ugu-ala* and *ugu-elu* are the two primary cultivars in Nigeria [87]. *Ugu-ala* has succulent, broad leaves, little black seeds, a thick stem, and moderate growth, while *ugu-elu*, has a quick growth rate, large brownish seeds with high viability, and a thin stem with small leaves [88]. The species exhibits genetic diversity through local accessions, genotypes, and sex-based variations (male vs. female plants), which influence agronomic traits, yield rate, and biochemical substances profiles. While research on varietal effects is emerging, studies on 20 accessions across locations in Nigeria reveal significant genotypic variability in proximate composition, minerals, vitamins, carotenes, and anti-nutrients, driven by genetic factors (with high heritability 60–100% for most traits) and genotype with environment interactions [89]. Similarly, cultivars like *ugu elu* and *ugu ala* show differences modulated by soil type and amendments, with principal component analysis (PCA) explaining 70% of variation primarily through agronomic and nutritional traits [88]. Sex dimorphism further affects properties, with female leaves often superior in proteins, vitamins, and antioxidants content. These variations enhance the species' potential for breeding nutrient-dense varieties for food security, malnutrition consequences alleviation, and nutraceutical applications, such as antioxidant supplements or anti-diabetic formulations [90].

T. occidentalis cultivars (*ugu elu, ugu ala*), and sexes impact nutritional and nutraceutical traits. *Ugu elu* had higher lipids content (1.625–2.0%) than *ugu ala* [90]. Female *T. occidentalis* exceed the male plants in protein (16.00% vs. 12.00% male), fiber (9.22% vs. 8.18%), ash (8.02–8.05% vs. 6.02–6.05%). Minerals such as potassium 224.4–261.8 mg/100 g (mean 240.8 mg/100 g), calcium 57.84–74.60 mg/100 g (mean 64.99 mg/100 g), magnesium 60.64–74.84 mg/100 g (mean 65.78 mg/100 g) are also higher in female plants. Furthermore, female *T. occidentalis* are higher in calcium, magnesium, iron content while males are higher in sodium, manganese content. Vitamin C content 95.48–117.5 mg/100 g (mean 105.7 mg/100 g) and carotene content 2.65–4.18 mg/100 g (mean 3.24mg/100 g) are higher in the male plants [91].

In terms of nutraceuticals, male specie of *T. occidentalis* feature greater concentrations of vitamin C, total antioxidants, and minerals than female plants. These substances are important due to their possible antioxidant and immune-stimulating qualities [91]. *Ugu ala* features higher antioxidant potential. These plants possess anti-diabetic, hepatoprotective, and antimicrobial benefits which are perfect for nutraceutical needs [90].

7. Potential applications in food formulations

7.1. Inclusion into dietary supplements

The seeds of *P. americana* and *T. occidentalis* are abundant in antioxidants, vital nutrients, and medicinal properties, what makes them essential components for dietary supplements aimed at addressing multiple health conditions and enhancing overall wellness. The inclusion of *P. americana* and *T. occidentalis* seeds into dietary supplements represents a promising strategy for augmenting nutritional value and mitigating various health challenges. Empirical evidence suggests that these seeds exhibit considerable health-promoting attributes, rendering them appropriate for diverse dietary applications [7,20]. The assimilation of these seeds can be accomplished through multiple methodologies, encompassing direct supplementation and innovative food fortification techniques. To ensure the safe incorporation of these seeds into food supplements, meticulous processing is crucial to preserve the nutrients while guaranteeing food safety for its consumption; appropriate preparation techniques such as soaking, boiling, roasting, or fermenting are crucial [26,40]. The seeds are ground into a fine powder to facilitate their using in the form of flour or extract. The processed seed powder can be integrated into diet in various supplement formats, including encapsulation, protein powder, functional foods, and tea. Furthermore, these seed extracts can be incorporated into liquid supplements to promote rapid absorption and easiness of consumption. Investigations have confirmed

that direct supplementation with *P. americana* seed flour has potential health benefits [7]. The research conducted by Uchenna et al. [92] revealed that the inclusion of *P. americana* seed flour in the diet had observable effects on the feeding and growth performance of rats. Additionally, diets supplemented with *P. americana* seed powder for culled female quail enhanced kidney and liver functions [93]. The seeds of *T. occidentalis* are occasionally processed into flour or fermented for its using as a protein supplement, functional agent, or flavoring component in a variety of local culinary applications [20]. The supplementation of foods such as broken rice flour with defatted *T. occidentalis* seed flour has demonstrated improvements in protein content, potentially mitigating protein-energy malnutrition [94]. Furthermore, Ali et al. [20] reported that diets supplemented with *T. occidentalis*-substituted bread exhibited significantly improved values of weight gain, protein efficiency ratio, and both apparent and true digestibility compared to the diets formulated with 100 % wheat flour bread, thus suggesting an expansion in the using of nutritional benefits of *T. occidentalis*-substituted composite bread. Although the integration of *P. americana* and *T. occidentalis* seeds into dietary supplements reveals substantial potential, concerns regarding their anti-nutritional factors necessitate careful consideration during formulation.

7.2. Uses in functional foods

Functional foods are specifically formulated to offer health advantages that extend beyond fundamental nutrition, thereby playing an essential role in the prevention and management of chronic illnesses. These foods are augmented with bioactive compounds that contribute to enhanced health outcomes [95]. The seeds of *P. americana* and *T. occidentalis* are increasingly acknowledged for their potential in functional foods, due to their rich nutritional composition and associated health benefits. These seeds serve as a significant source of vital nutrients and also demonstrate a range of bioactive properties that can promote human health. Empirical research suggests that these seeds can be effectively integrated into various food products, thereby improving their nutritional composition and functional attributes [17,20]. Figure 4 and 5 displayed *P. americana* and *T. occidentalis* seeds extracts and powder potential application in the functional foods. *P. americana* and *T. occidentalis* seeds can be effectively incorporated into functional food products such as baked goods, beverages, soups, as well as both dairy and non-dairy alternatives, and snacks. The incorporation of *P. americana* seed powder into snacks, baked foods, and beverages can substantially elevate their antioxidant capacity [17,96]. Furthermore, functional food products that include *P. americana* seed powder have received favorable responses in sensory evaluations, indicating a positive level of consumer acceptance [7,96]. *T. occidentalis* seeds can be used in a variety of food products, enhancing their nutritional value and potentially contributing to the mitigation of malnutrition consequence [94]. Additionally, their application in traditional culinary dishes, such as soups and stews, underlines their versatility in gastronomic applications [20].

7.3. Potential for nutraceutical development

The capacity of plant seeds for the advancement of nutraceuticals is substantial, as they are abundant in bioactive components that confer a multitude of health advantages and serve as a source of proteins, vitamins, and phytochemicals, which can be used for the formulation of functional foods and dietary supplements. Furthermore, they demonstrate antioxidative and anti-inflammatory properties, which contribute to the mitigation of various diseases [97]. The seeds of *P. americana* and *T. occidentalis* provide considerable promise for nutraceutical innovation due to their extensive nutritional composition and bioactive elements. Empirical studies suggest that these seeds encompass a diverse array of

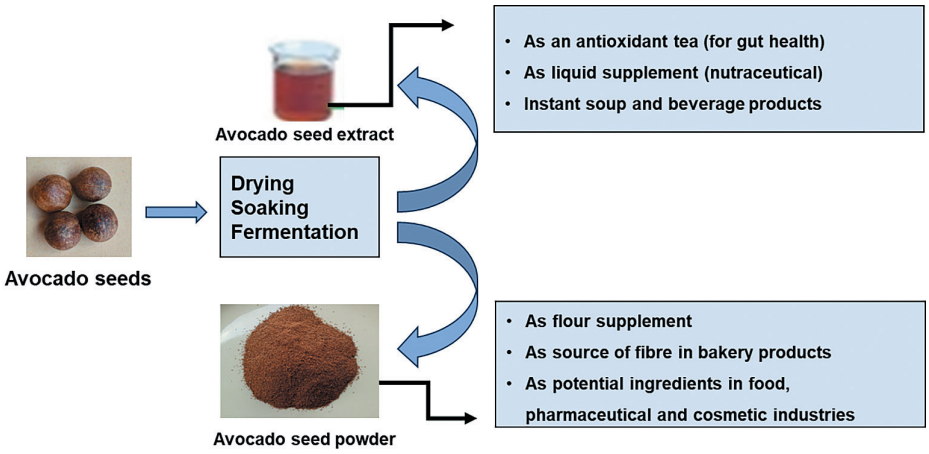


Figure 4. **Several applications of avocado seed powder and extracts in food formulations**

Рисунок 4. **Некоторые виды применения порошка и экстрактов из семени авокадо в составе рецептуры пищевых продуктов**

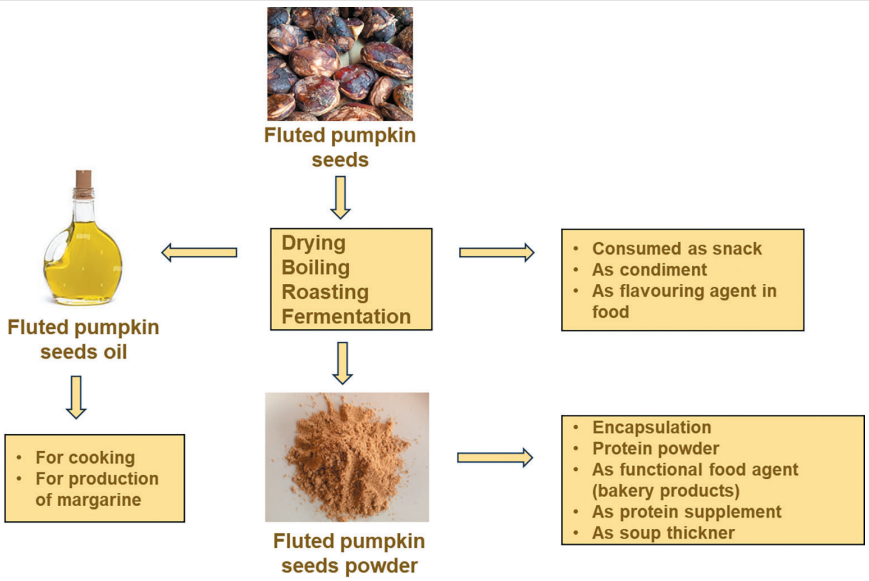


Figure 5. **Applications of *T. occidentalis* seed powder and extracts in food formulations**

Рисунок 5. **Виды применения порошка и экстрактов из семян *T. occidentalis* в составе рецептур пищевых продуктов**

phytochemicals, antioxidants, and essential micronutrients, establishing them as a valuable asset for health-enhancing applications [25,41]. Prominent domains for the nutraceutical application of *P. americana* seeds include: (1) antihyperglycemic effects — the extract of *P. americana* seeds markedly reduces blood glucose concentrations in lab rats, thus underlining its prospective utility in the management of diabetes [58]; (2) antioxidant products — *P. americana* seeds provide protection to cells against oxidative damage due to having polyphenols and flavonoids, which play a crucial role in combating oxidative stress [7]; (3) gut health and digestive support — *P. americana* seeds are characterized by a high dietary fiber content that fosters a balanced gut microbiota. This property enhances their antimicrobial characteristics, providing protection against pathogenic intestines bacteria and intestines infections [11]; (4) anti-obesity properties — *P. americana* seed powder has shown its ability to significantly mitigate weight gain and improve lipid profiles, thus reflecting its potential as an anti-obesity supplement [60].

In addition, *T. occidentalis* seeds are used for the advancement of nutraceuticals aimed at enhancing health outcomes in the following ways: (1) antioxidant capabilities — these seeds are rich in various phytochemicals, including flavonoids, tannins, and phenolic compounds, which facilitate the neutralization of free radicals, consequently preventing oxidative damage of cells within the organism and diminishing the likelihood of chronic diseases onset [66]; (2) cardiovascular system health supplements — the extracts derived from *T. occidentalis* seeds lower cholesterol levels owing to their abundance in unsaturated fatty acids, which contribute to cholesterol reduction, thereby decreasing the risk of cardiovascular system diseases and promoting heart health [71]; (3) human fertility and reproductive health nutraceuticals — *T. occidentalis* seeds are frequently used to augment human fertility and enhance sperm quality parameters [73]; (4) anti-diabetic property — *T. occidentalis* seeds assist in the regulation of blood glucose levels attributable to their hypoglycemic characteristics, making them significantly useful for diabetes management [69].

T. occidentalis and *P. americana* seeds exhibit substantial potential for the development of nutraceuticals. Through appropriate processing, formulation, and adherence to regulatory standards, they can serve as a valuable component in dietary supplements, functional foods, and herbal medicines.

7.4. Correlation between incorporated seed components, RDI achievement, and nutrients bioavailability

The correlation between the incorporated components of *P. americana* seeds and *T. occidentalis* seeds is defined by their nutritional complementation and functional synergy. Incorporating components from *P. americana* seeds and *T. occidentalis* seeds typically through blending them into composite flours involves using their complementary nutritional profiles for better complying with recommended daily intakes for key macronutrients and micronutrients. Although direct studies on blends of both seeds are not numerous, research on their individual flour supplementation highlights potential synergies [7,20,93,94]. *P. americana* seeds provide exceptional dietary fiber, and phenolic antioxidants, while *T. occidentalis* seeds deliver high-quality protein and mineral density (e.g., Mg, Zn). Blending balances and creates nutrient rich ingredients for functional foods like gluten-free breads, weaning food formulas, or supplements, addressing protein-energy malnutrition in tropical regions.

T. occidentalis seeds contribute directly and substantially to RDIs via their high protein, minerals and healthy fats contents. Seeds protein covers a large share of daily protein needs, while minerals (Mg, Fe, Zn, P) content often meet or exceed 50–100 % of RDIs while healthy lipids enhance caloric density and fat-soluble vitamin utilization absorption. Since it is a high-oil seed (~50 % fat), it meets the RDI for energy and healthy fatty acids. *P. americana* seeds contribute minimally to RDIs in absolute terms but provide with dietary fiber, polyphenols and antioxidants. Incorporating both seeds together in order to comply with RDIs for protein and minerals might be achieved mainly through consuming *T. occidentalis* while dietary fiber and antioxidant intake may be enhanced by *P. americana*. The combination of both seeds will improve nutrients diversity.

Both seeds share a major flaw — they contain anti-nutrients that lock away their nutrients from being digested, this way preventing the body from absorbing them (so called low bioavailability). Bioavailability which implies that part of nutrients is absorbed and utilized by body, but some part remains intact, is reduced by anti-nutrients; but it improves significantly with seeds processing. Phytates found in both seeds bind to minerals like iron, zinc, and calcium, reduce the minerals absorption and can hinder their utilization [37,41]. Tannins found in high concentrations in *P. americana* seeds (which cause the bitterness) [26] and in moderate concentrations in *T. occidentalis* seeds, bind to proteins, thus reducing their digestibility [20]. To improve bioavailability, both seeds must undergo similar processing methods (roasting, fermentation, soaking). Fermentation significantly increases the bioavailability of the nutrients in *T. occidentalis* seeds [40] while drying reduces the tannin content in *P. americana* seeds, making the limited range of minerals it possesses more absorbable [26].

8. Conclusion

The nutritional composition of *P. americana* and *T. occidentalis* seeds lays emphasis on their prospective health advantages. These seeds exhibit a robust nutritional profile distinguished by substantial concentrations of nutrients, phytochemicals, and minerals. Notwithstanding the abundant nutritional attributes of these seeds, they also contain anti-nutritional factors that may cause digestion complications. The presence of anti-nutritional factors necessitates appropriate processing of the seeds in order to augment their bioavailability and mitigate potential negative effects; such factors can be alleviated through suitable processing methodologies. This indicates that with proper and relevant preparation, *P. americana* and *T. occidentalis* seeds can be used more efficiently in food products, thereby potentially improving their nutritional profile. Both seeds exhibit comparable content of nutritional components; therefore, it is crucial to acknowledge that they also possess peculiar properties and should be used for specific applications. This highlights the varied potential applications of these seeds within diverse health support contexts. While the integration of *P. americana* and *T. occidentalis* seeds into dietary supplements demonstrates considerable promise, it is imperative to take into account the variability in individual responses to dietary modifications and the necessity for further investigation of the seeds properties in order to comprehensively understand the long-term implications, optimal strategies of their inclusion into food, and potential interactions with other pharmaceutical substances, which could constrain their using in nutraceuticals.

REFERENCES

1. Gan, R. -Y., Lui, W. -Y., Wu, K., Chan, C. -L., Dai, S. -H., Sui, Z. -Q. et al. (2017). Bioactive compounds and bioactivities of germinated edible seeds and sprouts: An updated review. *Trends in Food Science and Technology,* 59, 1–14. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2016.11.010
2. Okpoghono, J., Ukperegbulem, J. K., Onyesom, I. (2024). Neuroprotective aftermath of *Monodora myristica* and *Glycyrrhiza glabra* against cassava diet containing vacuum gas oil induced brain injury in Wistar rats. *Toxicology Report,* 12, 244–252. https://doi.org/10.1016/j.toxrep.2024.02.001
3. Okpoghono, J., Igue, U. B., Isoje, F. E., Okom, S. U., Seigha, A. A., Erorun, M. (2024). Assessment of vitamins and minerals of rats fed with plantain-maize pudding prepared using edible plant leaves and metallic plates. *Food Research,* 8(4), 143–150. https://doi.org/10.26656/fr.2017.8(4).359
4. Bhuyan, D. J., Alsherbiny, M. A., Perera, S., Low, M., Basu, A., Devi, O. A. et al. (2019). The odyssey of bioactive compounds in avocado (*Persea americana*) and their health benefits. *Antioxidants*, 8(10), Article 426. https://doi.org/10.3390/antiox8100426
5. Okpoghono, J. (2026). Preservative approaches, culinary and medicinal prospective mechanisms of herbs and spices: A compiled update. *Heliyon*, 12(1), Article e44306. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2025.e44306
6. Segovia, F. J., Hidalgo, G. I., Villasante, J., Ramis, X., Almajano, M. P. (2018). Avocado seed: A comparative study of antioxidant content and capacity in protecting oil models from oxidation. *Molecules*, 23(10), Article 2421. https://doi.org/10.3390/molecules23102421
7. Bangar, S. P., Dunno, K., Dhull, S. B., Kumar-Siroha, A., Changan, S., Maqsood, S. et al. (2022). Avocado seed discoveries: Chemical composition, biological properties, and industrial food applications. *Food Chemistry: X,* 16, Article 100507. https://doi.org/10.1016/j.fochx.2022.100507
8. Okpoghono, J., Osioma, E., Metie, S. O., Igue, U. B., Isoje, E. F., Okom, S.U. (2023). *Xylopiaa ethiopica* HPLC-DAD polyphenol profiling and antioxidant status from South-South region of Nigeria. *Ovidius University Annals of Chemistry,* 34(2), 104–111. https://doi.org/10.2478/auoc-2023-0014
9. Okpoghono, J., Jacdonmi, O., Igue, U. B., Iyhe, P., Isoje, E. F., Okom, S. U. et al. (2023). Comparative study of polyphenol profile after stimulated post-intestinal digestion of raw and dried ginger leaves. *Annals of Science and Technology,* 8(2), 22–29. https://doi.org/10.2478/ast-2023-0012
10. Okom, S. U., Ojugbeli, E. T., Okpoghono, J., Onyesom, I. (2023). Safety and antimalarial therapeutic index of alkaloid-rich extract of *Phyllanthus amarus* Schumach. and Thonn. in mice. *Heliyon,* 9(12), Article e23078. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e23078
11. Kupnik, K., Primožič, M., Kokol, V., Knez, Ž., Leitgeb, M. (2023). Enzymatic, antioxidant, and antimicrobial activities of bioactive compounds from avocado (*Persea americana* L.) seeds. *Plants*, 12(5), Article 1201. https://doi.org/10.3390/plants12051201
12. Okpoghono, J., Ukperegbulem, J. K., Igue, U. B. (2024). Anti-lipidemic and protein restoration potential of *Monodora myristica* (Gaertn.) in rats fed with cassava

containing crude oil. *Food and Raw Materials,* 12(2), 249–255. https://doi.org/10.21603/2308-4057-2024-2-602
13. Okpoghono, J., Okonta, C.I., Omoike, G.O., Ekayoda, O., Okuchukwu, O., Onakurhefe, P. (2025). Antioxidant properties, phytochemicals and health benefit of 'Red Delicious' *Malus domestica*. *Discover Food,* 5, Ariticle 431. https://doi.org/10.1007/s44187-025-00724-9
14. 14. Samtiya, M., Acharya, S., Pandey, K. K., Aluko, R. E., Udenigwe, C. C., Dhewa, T. (2021). Production, purification, and potential health applications of edible seeds' bioactive peptides: A concise review. *Foods*, 10(11), Article 2696. https://doi.org/10.3390/foods10112696
15. Athaydes, B. R., Tosta, C., Carminati, R. Z., Kuster, R. M., Kitagawa, R. R., Gonçalves, R. de C. R. (2022). Avocado (*Persea americana* Mill.) seeds compounds affect Helicobacter pylori infection and gastric adenocarcinoma cells growth. *Journal of Functional Foods*, 99, Article 105352. https://doi.org/10.1016/j.jff.2022.105352
16. Setyawan, H. Y., Sukardi, S., Puriwangi, C. A. (August 25, 2021). *Phytochemicals Properties of Avocado Seed: A Review.* IOP Conference Series: Earth and Environmental Science International Conference on Green Agro-industry and Bioeconomy. Malang, Indonesia, 2021. https://doi.org/10.1088/1755-1315/733/1/012090
17. Siol, M., Sadowska, A. (2023). Chemical composition, physicochemical and bioactive properties of avocado (*Persea americana*) seed and its potential use in functional food design. *Agriculture*, 13(2), Article 316. https://doi.org/10.3390/agriculture13020316
18. Ahmed, N., Smith, R. W., Henao, J. J. A., Stark, K. D., Spagnuolo, P. A. (2018). Analytical method to detect and quantify avocatin B in hass avocado seed and pulp matter. *Journal of Natural Products,* 81(4), 818–824. https://doi.org/10.1021/acs.jnatprod.7b00914
19. Oluwagunwa, O. A., Alashi, A. M., Riedl, K., Aluko, R. E. (2024). Effect of chlorophyll content on the multifunctional properties of *Telfairia occidentalis* aqueous leaf polyphenolic concentrate. *South African Journal of Botany*, 174, 85–95. https://doi.org/10.1016/j.sajb.2024.08.058
20. Ali, A. I., Dandago, M. A., Ali, F. I. (2024). Food applications of *Telfairia occidentalis* as a functional ingredient and nanoencapsulation as a promising approach toward enhancing food fortification. Chapter in a book: Phytochemicals in Agriculture and Food. InTechOpen, 2024. https://doi.org/10.5772/intechopen.111716
21. Osukoya, O. A., Adegbenro, D., Onikanni, S. A., Ojo, O. A., Onasanya, A. (2016). Antinociceptive and antioxidant activities of the methanolic extract of *Telfairia occidentalis* seeds. *Ancient Science of Life*, 36, 98–103. https://doi.org/10.4103/asl.ASL_142_16
22. Ifesan, B. O. T., Olorunsola, B. O., Ifesan, B.T. (2015). Nutritional composition and acceptability of candy from avocado seed (Persea americana). *International Journal of Agriculture Innovations and Research,* 3(6), 1631–1634.
23. Omorevbarhia, O., Umerie, S. C., Aniefuna, E. L., Enoch, O. C. (2023). Proximate, phytochemical and mineral composition of methanol extract of persea americana seed. *International Journal of Biochemistry Research and Review,* 32(2), 1–9. https://doi.org/10.9734/ijbcrr/2023/v32i2797
24. Báez-Magaña, M., Ochoa-Zarzosa, A., Alva-Murillo, N., Salgado-Garciglia, R., López-Meza, J. E. (2019). Lipid-rich extract from Mexican avocado seed (*Persea americana* var. drymifolia) reduces staphylococcus aureus internalization and regulates innate immune response in bovine mammary epithelial cells. *Journal of Immunology Research,* 2019, Article 7083491. https://doi.org/10.1155/2019/7083491
25. Okorie, N. H., Omorevbarhia, O., Umerie, S. C., Aniefuna, E. L., Ujam, N. T., Ali, I. J. (2024). Proximate, phytochemical, mineral composition and antioxidant effects of methanol extract of Persea americana (avacado pear) seed. *Fudma Journal of Sciences,* 8(3), 166–174. https://doi.org/10.33003/fjs-2024-0803-2303
26. Egbuonu, A. C. C., Opara, I. C., Onyeabo, C., Uchenna, N. O. (2018). Proximate, functional, antinutrient and antimicrobial properties of avocado pear (*Persea americana*) seeds. *Journal of Nutritional Health and Food Engineering,* 8(1), 78–82. https://doi.org/10.15406/jnhfe.2018.08.00260
27. Mahawan, M. A., Francia, M., Tenorio, N., Gomez, J. A., Bronce, R. A. (2015). Characterization of flour from avocado seed kernel. *Asia Pacific Journal of Multidisciplinary Research*, 3(4), 34–40.
28. Ejiofor, N. C., Ezeagu, I. E., Ayoola, M. B., Umera, E. A. (2018). Determination of the chemical composition of avocado (*Persea Americana*) seed. *Advances in Food Technology and Nutritional Sciences — Open Journal,* SE(2), S51-S55. https://doi.org/10.17140/aftnsoj-se-2-107
29. Arukwe, U., Amadi, B. A., Duru, M. K. C., Agomuo, E. N., Adindu, E. A., Odika, P. C. et al. (2012). Chemical composition of *Persea americana* leaf, fruit and seed. *International Journal of Research and Reviews in Applied Sciences,* 11(2), 346–349.
30. Office of the Assistant Secretary for Health (OASH). Nutritional goals for each age/sex group used in assessing adequacy of USDA Food Patterns at various calorie levels. National Archives. Retrieved from https://odphp.health.gov/sites/default/files/2019-09/Appendix-E3-1-Table-A4.pdf Accessed August 29, 2025
31. Kulczyński, B., Kobus-Cisowska, J., Taczanowski, M., Kmiecik, D., Gramza-Michałowska, A. (2019). The chemical composition and nutritional value of chia seeds-current state of knowledge. *Nutrients,* 11(6), Article 1242. https://doi.org/10.3390/nu11061242
32. Biswas, S., Islam, F., Imran, A., Zahoor, T., Noreen, R., Fatima, M. et al. (2023). Phytochemical profile, nutritional composition, and therapeutic potentials of chia seeds: A concise review. *Cogent Food and Agriculture,* 9(1), Article 2220516. https://doi.org/10.1080/23311932.2023.2220516
33. Asad, M., Malik, A. (2024). Almond varieties: Nutritional and chemical composition and health benefits and culinary application. Chapter in a book: Nut Consumption and its Usefulness in the Modern World. IntechOpen, 2024. https://doi.org/10.5772/intechopen.1005139
34. Barreca, D., Nabavi, S. M., Sureda, A., Rasekhian, M., Raciti, R., Silva, A. S. et al. (2020). Almonds (Prunus Dulcis Mill. D. A. Webb): A Source of Nutrients and Health-Promoting Compounds. *Nutrients,* 12(3), Article 672. https://doi.org/10.3390/nu12030672
35. Jimenez, P., Garcia, P., Quitral, V., Vasquez, K., Parra-Ruiz, C., Reyes-Farias, M. et al. (2020). Pulp, leaf, peel and seed of avocado fruit: A review of bioactive compounds and healthy benefits. *Food Reviews International*, 37(6), 619–655. https://doi.org/10.1080/87559129.2020.1717520
36. Zhang, K., Dong, R., Hu, X., Ren, C., Li, Y. (2021). Oat-based foods: Chemical constituents, glycemic index, and the effect of processing. *Foods,* 10(6), Article 1304. https://doi.org/10.3390/foods10061304
37. Bahru, T. B., Tadele, Z. H., Ajebe, E.G. (2019). A review on avocado seed: Functionality, composition, antioxidant and antimicrobial properties. *International Journal of Chemical Sciences,* 27(2), 1–10. https://doi.org/10.9734/CSJI/2019/v27i230112
38. Asiwe, E. S., Igwe, C. U., Iheanacho, K. M. E., Onyeocha, I. O., Onwuliri. V. A. (2021). Bioactive composition and acute oral toxicity studies on *Persea Americana* seed ethyl acetate fraction. *Asian Journal of Research in Biochemistry*, 8(4), 10–17. https://doi.org/10.9734/ajrb/2021/v8i430186
39. Achu, M. B. M., Djuikwo, R. V., Tamo, S. G., Fotso, C. L. M., Fowe, M. C. D., Fokou, E. (2021). Physical characteristics and the effect of boiling and fermentation on the nutritional value of Telfairia occidentalis seeds. *Journal of Agricultural Chemistry and Environment,* 10(4), 389–401. https://doi.org/10.4236/jacen.2021.104025
40. Miteu, G. D., Ezeh, B. C. (2022). Effects of roasting periods on the nutritive value of telfaira occidentalis (*Fluted Pumpkin*) seeds. *IPS Journal of Nutrition and Food Science,* 1(1), 6–10. https://doi.org/10.54117/ijnfs.v1i1.2
41. Ouattara, N., Digbeu, Y. D., Koffi, Y. G., Due, A. (2022). Nutritional potentiality and antinutritional properties of *Telfairia occidentalis* from Côte d'Ivoire. *GSC Biological and Pharmaceutical Sciences,* 18(02), 338–343. https://doi.org/10.30574/gscbps.2022.18.2.0073
42. Chuku, L. C., Chinaka, N. C. (2021). Proximate and phytochemical compositions of dried seeds of fluted pumpkin (*Telfairia occidentalis*). *Journal of Complementary and Alternative Medical Research,*13(1), 14–19. https://doi.org/10.9734/JOCAMR/2021/v13i130215
43. Nzeagwu, O. C. Amadi, A. U. (2020). Effect of processing on chemical composition of fluted pumpkin (*Telfairia occidentalis*) seed flour and sensory evaluation of soup produced from the flour. *Nigerian Journal of Nutritional Sciences*, 41(1), 132–140.
44. Eseyin, O. A., Sattar, M. A., Rathore, H. A. (2014). A Review of the pharmacological and biological activities of the aerial parts of *Telfairia occidentalis* Hook. f. (Cucurbitaceae). *Tropical Journal of Pharmaceutical Research.* 13(10), 1761–1769. https://doi.org/10.4314/tjpr.v13i10.28
45. Batool, M., Ranjha, M. M. A. N., Roobab, U., Manzoor, M. F., Farooq, U., Nadeem, H. R. et al. (2022). Nutritional value, phytochemical potential, and therapeutic benefits of pumpkin (*Cucurbita* sp.). *Plants,* 11(11), Article 1394. https://doi.org/10.3390/plants11111394
46. Singh, A., Kumar, V. (2024). Pumpkin seeds as nutraceutical and functional food ingredient for future: A review. *Grain and Oil Science and Technology,* 7(1), 12–29. https://doi.org/10.1016/j.gaost.2023.12.002
47. Petraru, A., Ursachi, F., Amariei, S. (2021). Nutritional characteristics assessment of sunflower seeds, oil and cake. perspective of using sunflower oilcakes as a functional ingredient. *Plants,* 10(11), Article 2487. https://doi.org/10.3390/plants10112487
48. Aanchal. (2023). Nutritional and health benefits of soybean and soybean developed food. *The Pharma Innovation Journal,* 12(6), 4991–4999.
49. Singh, P., Pandey, V. K., Sultan, Z., Singh, R., Dar, A. H. (2023). Classification, benefits, and applications of various anti-nutritional factors present in edible crops. *Journal of Agriculture and Food Research*, 14, Article 100902. https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100902
50. Samtiya, M., Aluko, R. E. Dhewa, T. (2020). Plant food anti-nutritional factors and their reduction strategies: An overview. *Food Production, Processing and Nutrition*, 2, Article 6. https://doi.org/10.1186/s43014-020-0020-5
51. Salim, R., Nehvi, I. B., Mir, R. A., Tyagi, A., Ali, S., Bhat, O. M. (2023). A review on anti-nutritional factors: Unraveling the natural gateways to human health. *Frontiers in Nutrition,* 10, Article 1215873. https://doi.org/10.3389/fnut.2023.1215873
52. Ahmed, O. M., Fahim, H. I., Mohamed, E. E., Abdel-Moneim, A. (2022). Protective effects of *Persea americana* fruit and seed extracts against chemically induced liver cancer in rats by enhancing their antioxidant, anti-inflammatory, and apoptotic activities. *Environmental Science and Pollution Research International*, 29(29), 43858–43873. https://doi.org/10.1007/s11356-022-18902-y
53. Marra, A., Manousakis, V., Zervas, G. P., Koutis, N., Finos, M. A., Adamantidi, T. et al. (2024). Avocado and its by-products as natural sources of valuable anti-inflammatory and antioxidant bioactives for functional foods and cosmetics with health-promoting properties. *Applied Sciences*, 14(14), Article 5978. https://doi.org/10.3390/app14145978
54. Osukoya, O. A., Oyinloye, B. E., Ajiboye, B. O., Olokode, K. A., Adeola, H. A. (2021). Nephroprotective and anti-inflammatory potential of aqueous extract from *Persea americana* seeds against cadmium-induced nephrotoxicity in Wistar rats. *Biometals*, 34(5), 1141–1153. https://doi.org/10.1007/s10534-021-00333-w
55. Alkhalaf, M. I., Alansari, W. S., Ibrahim, E. A., Elhalwagy, M. E. (2018). Anti-oxidant, anti-inflammatory and anti-cancer activities of avocado (*Persea americana*) fruit and seed extract. *Journal of King Saud University — Science*, 31(4), 1358–1362. https://doi.org/10.1016/j.jksus.2018.10.010
56. Dabas, D., Elias, R. J., Ziegler, G. R., Lambert, J. D. (2019). *In vitro* antioxidant and cancer inhibitory activity of a colored avocado seed extract. *International Journal of Food Science*, 2019, Article 6509421. https://doi.org/10.1155/2019/6509421
57. Ojo, O. A., Amanze, J. C., Oni, A. I., Grant, S., Iyobhebhe, M., Elebiyo, T. C. et al. (2022). Antidiabetic activity of avocado seeds (*Persea americana* Mill.) in diabetic rats via activation of PI3K/AKT signaling pathway. *Scientific Reports*, 12(1), Article 2919. https://doi.org/10.1038/s41598-022-07015-8
58. Makasa, Y., (2024). Evaluation of the ameliorative effects of *Persea americana* seeds on the biochemical and hematological parameters in type 2 diabetic rats. *Journal of Clinical and Biomedical Sciences*, 14(3), 105–114. https://doi.org/10.58739/jcbs/v14i3.109
59. Ogbonnaya, E. A., Belonwu, D. C., Ezim, O. E., Umeh, U. (2024). Ameliorative potentials of *Persea americana* Mill (Avocado) seed extract on acetaminophen-induced hepatic insufficiency in rats. *Asian Journal of Research in Biochemistry,* 14(2), 28–39. https://doi.org/10.9734/ajrb/2024/v14i2281

60. Mokhele, S., Aboyade, O., Katerere, D. R. (2024). Obesity prevention effects of avocado (*Persea americana*) seed powder in high-fat diet-induced obesity in rats. *Nutraceuticals,* 4(3), 417–429. https://doi.org/10.3390/nutraceuticals4030025
61. García-Berumen, C. I., Vargas-Vargas, M. A., Ortiz-Avila, O., Piña-Zentella, R. M., Ramos-Gómez, M., Figueroa-García, M. del C. et al (2022). Avocado oil alleviates non-alcoholic fatty liver disease by improving mitochondrial function, oxidative stress and inflammation in rats fed a high fat-High fructose diet. *Frontiers in Pharmacology,* 13, Article 1089130. https://doi.org/10.3389/fphar.2022.1089130
62. Sánchez-Quezada, V., Velázquez-Guadarrama, N., Mendoza-Elizalde, S., Hernández-Iturriaga, M., Landaverde, P. V., Loarca-Piña, G. (2024). Bioaccessibility of bioactive compounds present in *Persea americana* Mill. seed ingredient during oral-gastric digestion with antibacterial capacity against *Helicobacter pylori*. *Journal of Ethnopharmacology*, 331, Article 118259. https://doi.org/10.1016/j.jep.2024.118259
63. Falodun, A., Erharuyi, O., Imieje, V., Ahomafor, J., Akunyuli, C., Jacobs, M. et al. (2014). *In vitro* evaluation of aliphatic fatty alcohol metabolites of *Persea americana* seed as potential antimalarial and antimicrobial agents. *Nigerian Journal of Biotechnology*, 27, 1–7.
64. Jiménez-Arellanes, A., Luna-Herrera, J., Ruiz-Nicolás, R., Cornejo-Garrido, J., Tapia, A., Yépez-Mulia, L. (2013). Antiprotozoal and antimycobacterial activities of *Persea americana* seeds. *BMC Complementary and Alternative Medicine,* 13(1), Article 109. https://doi.org/10.1186/1472-6882-13-109
65. Oboh, G., Odubanjo, V. O., Bello, F., Ademosun, A. O., Oyeleye, S. I., Nwanna, E. E. (2016). Aqueous extracts of avocado pear (*Persea americana* Mill.) leaves and seeds exhibit anti-cholinesterases and antioxidant activities *in vitro*. *Journal of Basic and Clinical Physiology and Pharmacology*, 27(2), 131–140. https://doi.org/10.1515/jbcpp-2015-0049
66. Agada, S. A., Odama, R. I., Kenechukwu, C. O., Aondoaseer, K., Ezeh, C. O., Uti, D. E. et al. (2024). Antioxidant and hepatoprotective effects of methanolic seed extract of *Telfairia occidentalis* on carbon tetrachloride induced hepatic damage in Wistar rats. *Discover Medicine,* 1, Article 75. https://doi.org/10.1007/s44337-024-00096-6
67. Onuoha, N., Iroegbu, L. U., Ejike, C. E. (2017). Anti-diabetic properties of the seeds of fluted pumpkin (Telfairia occidentalis Hook f.) in a rat model of alloxan-induced diabetes mellitus. *Biokemistri*, 87–93.
68. Olasehinde, O. R., Acho, M. A., Afolabi, O. B., Arise, R. O. (2023). Peptide hydrolysate of *Telfairia occidentalis* Hook f. seed protein promotes effective glucose homeostasis by improving β-cell dysfunction and abating carbohydrate metabolic disturbance in diabetic rats. *Journal of Food Biochemistry*, 2023, Article 6652466. https://doi.org/10.1155/2023/6652466
69. Agu, F. U., Kalu, A. K., Akunneh-Wariso, C., Chinedu, I. B., Dimgba, U. C. (2023). Evaluation of the anti-diabetic potential of methanol seed extract of *Telfairia occidentalis*. *GSC Biological and Pharmaceutical Sciences*, 24(03), 274–278. https://doi.org/10.30574/gscbps.2023.24.3.0349
70. Onuegbu, A. J., Olisekodiaka, J. M, Ude, T., Amah, U. K., Okwara, J. E., Ifeadike, C. et al. (2015). Effects of *Telfairia occidentalis* seeds on the serum lipid profile and atherogenic indices of male albino wistar rats. *Pakistan Journal of Nutrition*, 14(9), 557–562. https://doi.org/10.3923/pjn.2015.557.562
71. Daramola, O. O., Oyeyemi, W. A., Onyendilefu, G. (2016). Effects of methanol extract of *Telfairia occidentalis* seed on serum lipid profile, biochemical and antioxidant activity in female Wistar rats. *European Journal of Medicinal Plants,* 15(2), 1–8. https://doi.org/10.9734/EJMP/2016/26723
72. Okokon, J. E., Farooq, A. D., Choudhary, M. I., Antia, B. S. (2012). Immunomodulatory, anticancer and anti-inflammatory activities of telfairia occidentalis seed extract and fractions. *International Journal of Food Nutrition and Safety*, 2(2), 72–85.
73. Njoku, R. -C. C., Abarikwu, S. O. (2021). Antifertility and profertility effects of the leaves and seeds of fluted pumpkin: Sperm quality, hormonal effects and histomorphological changes in the testes of experimental animal models. *Journal of Integrative Medicine,* 19(2), 104–110. https://doi.org/10.1016/j.joim.2021.01.007
74. Njoku, R. -C. C., Abarikwu, S. O., Uwakwe, A. A., Mgbudom-Okah, C. J. (2018). *Telfairia occidentalis* -supplemented diet induces changes in sperm parameters and testosterone level in rats. *Andrologia,* 50(7), Article e13044. https://doi.org/10.1111/and.13044
75. Ademiluyi, A. O., Oyeniran, O. H., Jimoh, T. O., Oboh, G., Boligon, A. A. (2019). Fluted pumpkin (*Telfairia occidentalis*) seed modulates some markers of erectile function in isolated rat's corpus cavernosum: Influence of polyphenol and amino acid constituents. *Journal of Food Biochemistry,* 43(11), Article e13037. https://doi.org/10.1111/jfbc.13037
76. Ekayoda, O., Kadiri, H. E., Apiamu, A., Okpoghono, J. (2025). Comparative analysis of amino acid, proximate and mineral compositions of Persea americana seeds and *Telfairia occidentalis* seeds formulated diet. *Food and Humanity,* 4, Article 100564. https://doi.org/10.1016/j.foohum.2025.100564
77. Ekayoda, O., Kadiri, H. E., Apiamu, A., Okpoghono, J. (2025). Evaluating the impact of *Persea americana* and *Telfairia occidentalis* seeds in the liver of anaemic rats. *Food Chemistry Advances*, 6, Article 100942. https://doi.org/10.1016/j.focha.2025.100942
78. Paternina-Ricardo, S., Del Castillo, M.D., Sánchez-Martin, V., Garcia-Espiñeira, M., Cervantes- Ceballos, L., Arroyo-Salgado, B. et al. (2025). Exploring the efficacy of the biological properties of *Persea americana* Mill seed: Useful studies and perspectives in functional foods. *Journal of Agriculture and Food Research*, 24, Article 102428. https://doi.org/10.1016/j.jafr.2025.102428
79. Nasri, C., Halabi, Y., Aghzaf, S., Nounah, I., Brunel, M., Oubihi, A. et al. (2022). Seven *Persea americana* varieties essential oils comparison: Chemical composition, toxicity, antibacterial, and antioxidant activities. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 44, Article 102468. https://doi.org/10.1016/j.bcab.2022.102468
80. Gonçalves, D., Gouveia, C. S. S., Ferreira, M. J., Ganança, J. F. T., Pinto, D. C. G., De Carvalho, M. A. A. P. (2024). Comparative analysis of antioxidant and fatty acid composition in avocado (*Persea americana* Mill.) fruits: Exploring regional and commercial varieties. *Food Chemistry*, 442, Article 138403. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.138403
81. Nascimento, A. P. S., Duarte, M. E. M., Rocha, A. P. T., Barros, A. N. (2025). Bioactive compounds, technological advances, and sustainable applications of avocado (*Persea americana* Mill.): A critical review. *Foods*, 14(15), Article 2746. https://doi.org/10.3390/foods14152746
82. Nasri, C., Halabi, Y., Hajib, A., Choukri, H., Harhar, H., Lee, L.-H. et al. (2023). Proximate composition, lipid and elemental profiling of eight varieties of avocado (*Persea americana*). *Scientific Reports*, 13(1), Article 22767. https://doi.org/10.1038/s41598-023-50119-y
83. De Oliveira, C.S., Andrade, J.K.S., Rajan, M., Narain, N. (2022). Influence of the phytochemical profile on the peel, seed and pulp of Margarida, Breda and Geada varieties of avocado (*Persea americana* Mill.) associated with their antioxidant potential. *Food Science and Technology,* 42, Article e25822. https://doi.org/10.1590/fst.25822
84. Ford, N. A., Spagnuolo, P., Kraft, J., Bauer, E. (2023). Nutritional composition of Hass avocado pulp. *Foods*, 12(13), Article 2516. https://doi.org/10.3390/foods12132516
85. Olas, B. (2024). The pulp, peel, seed, and food products of *Persea americana* as sources of bioactive phytochemicals with cardioprotective properties: A review. *International Journal of Molecular Sciences*, 25(24), Article 13622. https://doi.org/10.3390/ijms252413622
86. Aworunse, O. S., Popoola, J. O., Fayeun, L. S., Ahuekwe, E. F., Obembe, O. O. (2023). Morphological trait variation and correlation analysis in landraces of southern nigerian fluted pumpkin (*Telfairia occidentalis* Hook. F.). Chapter in a book: Biotechnological Approaches to Sustainable Development Goals. Springer, Cham, 2023. https://doi.org/10.1007/978-3-031-33370-5_5
87. Kayode, A. A. A., Kayode, O. T. (2011). Some medicinal values of *Telfairia occidentalis*: A review. *American Journal of Biochemistry and Molecular Biology*, 1(1), 30–38. https://doi.org/10.3923/ajbmb.2011.30.38
88. Ezenwata, I. S., Onyemeka, R. M., Makinde, S. C. O., Anyaegbu, C. F., Ogbuoka, R. C., Oyetunji, O. S. (2019). Analysis of variation among genotypes of fluted pumpkin (*Telfairia occidentalis* hook. f) using factor analysis and principal component analysis (PCA). *International Journal of Engineering Applied Sciences and Technology*, 4(7), 211–216. https://doi.org/10.33564/ijeast.2019.v04i07.035
89. Okon, U.I., Silver, E.O., Emeka, N.G. (2022). Genetic variability in proximate, mineral, vitamin, carotene and anti-nutrients content of fluted pumpkin (*Telfairia Occidentalis* Hook F). *International Journal of Trend in Scientific Research and Development,* 6(6), 962–970.
90. Oyetunde, O., Benson, G. A. S., Oyetunde, A. K., Olalekan, O. J., Chukwu, C. U., Anari, K. O. (2023). Agromorphological and nutritional quality profiles of fluted pumpkin (*Telfairia occidentalis* Hook F.) as influenced by cultivar, growing medium and soil amendment source. *International Journal of Horticultural Science*. https://doi.org/10.31421/ijhs/29/2023/11020
91. Akin-Idowu, P. E., Onuoha, V. W., Aderibigbe, O. R., Taiwo, S. O., Ikoro, J., Akinleye, C. O. et al. (November 12–16, 2023). *Sex differences in phytochemical and nutritional compositions of fluted pumpkin (Telfairia occidentalis) leaves*. Proceedings of 41st Annual Conference of Hortson. Ogbomoso, Oyo State, Nigeria, 2023.
92. Uchenna, U. E., Shori, A. B., Baba, A. S. (2017). Inclusion of avocado (*Persea americana*) seeds in the diet to improve carbohydrate and lipid metabolism in rats. *Revista Argentina de Endocrinología y Metabolism,* 54(3), 140–148. https://doi.org/10.1016/j.raem.2017.07.005
93. Tugiyanti, E., Iriyanti, N., Apriyanto, Y. S. (2019). The effect of avocado seed powder (Persea americana Mill.) on the liver and kidney functions and meat quality of culled female quail (*Coturnix coturnix japonica*). *Veterinary World*, 12(10), 1608–1615. https://doi.org/10.14202/vetworld.2019.1608-1615
94. Udoh, I.E., Onwuka, G.I., Ndife, J., Jim, M.S. (2024). Effect of fluted pumpkin (*Telfairia occidentalis*) seed flour supplementation on the nutritional and chemical properties of broken rice flour. *African Journal of Agricultural Science and Food Research,* 17(1), 1–14. https://doi.org/10.62154/ajasfr.2024.017.010439
95. Vignesh, A., Amal, T. C., Sarvalingam, A., Vasanth, K. (2024). A review on the influence of nutraceuticals and functional foods on health. *Food Chemistry Advances*, 5, Article 100749. https://doi.org/10.1016/j.focha.2024.100749
96. Nyakang'i, C.O., Marete, E., Ebere, R., Arimi, J. M. (2023). Physicochemical properties of avocado seed extract model beverages and baked products incorporated with avocado seed powder. *International Journal of Food Science*, 2023, Article 6860806. https://doi.org/10.1155/2023/6860806
97. Kamle, M., Mahato, D. K., Sharma, B., Gupta, A., Shah, A. K., Mahmud, M. M. C. et al. (2024). Nutraceutical potential, phytochemistry of hemp seed (*Cannabis sativa* L.) and its application in food and feed: A review. *Food Chemistry Advances*, 4, Article 100671. https://doi.org/10.1016/j.focha.2024.100671

AUTHOR INFORMATION	СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ
Affiliation	**Принадлежность к организации**
Ovigueroye Ekayoda, PhD, Lecturer, Department of Biochemistry, Faculty of Science, Delta State University P.M.B. 1, Abraka, Delta State, Nigeria E-mail: kayovidex@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4846-8513 * corresponding author	**Экайода О.** — PhD, преподаватель Кафедра биохимии, факультет естественных наук, Университет штата Дельта P.M.B. 1, Абрака, штат Дельта, Нигерия E-mail: kayovidex@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4846-8513 * автор для контактов
Helen E. Kadiri, PhD, Lecturer, Department of Biochemistry, Faculty of Science, Delta State University P.M.B. 1, Abraka, Delta State, Nigeria E-mail: Kadiri@delsu.edu.ng ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1303-3680	**Кадири Хелен Е.** — PhD, преподаватель, Кафедра биохимии, факультет естественных наук, Университет штата Дельта P.M.B. 1, Абрака, штат Дельта, Нигерия E-mail: Kadiri@delsu.edu.ng ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1303-3680
Augustine Apiamu, PhD, Lecturer/Researcher, Department of Biochemistry, Faculty of Science, Delta State University P.M.B. 1, Abraka, Delta State, Nigeria E-mail: aapiamu@delsu.edu.ng ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5841-0027	**Апиаму А.** — PhD, преподаватель- исследователь, Кафедра биохимии, факультет естественных наук, Университет штата Дельта P.M.B. 1, Абрака, штат Дельта, Нигерия E-mail: aapiamu@delsu.edu.ng ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5841-0027
Joel Okpoghono, PhD, Lecturer, Department of Biochemistry, Faculty of Science, Southern Delta University P. M. B. 05, Ozoro-Kwale Road, Ozoro, Delta State, Nigeria E-mail: okpoghonoj@dsust.edu.ng ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5886-1765	**Окпохоно Дж.** — PhD, преподаватель, Кафедра биохимии, факультет естественных наук, Университет Южной Дельты P. M. B. 05, дорога Озоро-Квале, Озоро, штат Дельта, Нигерия E-mail: okpoghonoj@dsust.edu.ng ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5886-1765
Contribution	**Критерии авторства**
Ovigueroye Ekayoda: Writing — original draft; funding acquisition, investigation, methodology; review and editing. **Helen Ejiro Kadiri**: Supervision, project administration, conceptualization, validation, review and editing, **Augustine Apiamu**: Supervision, project administration conceptualization, validation, review and editing. **Joel Okpoghono**: resources, software, formal analysis, review and editing.	**Экайода О.**: Написание первоначального проекта, привлечение финансирования, исследование, методология, рецензирование и редактирование. **Кадири Х. Э.**: Авторский надзор, управление проектом, разработка концепции, валидация, обзор и редактирование. **Апиаму А.**: Авторский надзор, разработка концепции управления проектом, проверка, обзор и редактирование. **Окпогоно Дж.**: ресурсы, программное обеспечение, формальный анализ, рецензирование и редактирование.
Conflict of interest	**Конфликт интересов**
The authors declare that there is no conflict of interest.	Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

DOI: https://doi.org/10.21323/2618-9771-2026-9-2-306-315

Поступила 05.05.2026
Поступила после рецензирования 06.06.2026
Принята в печать 10.06.2026
© Мамыкин Д. С., Шухалова О. М., Волкова Т. А., Бородина У. В., Григорьева А. И., 2026

https://www.fsjour.com/jour
Научная статья
Открытый доступ

ОЦЕНКА МЕТОДОВ ОСАЖДЕНИЯ БЕЛКОВ ПОДСЫРНОЙ СЫВОРОТКИ ПО ЭФФЕКТИВНОСТИ И ФРАКЦИОННОМУ СОСТАВУ

Мамыкин Д. С.*, Шухалова О. М., Волкова Т. А., Бородина У. В., Григорьева А. И.

Всероссийский научно-исследовательский институт маслоделия и сыроделия, Углич, Ярославская область, Россия

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:
сывороточные белки, хитозан, денатурация, кислотно-щелочная коагуляция, изоэлектрическое осаждение

АННОТАЦИЯ

Подсырная сыворотка является крупнотоннажным побочным продуктом переработки молока и характеризуется высокой биологической ценностью. Однако ее нерациональное использование может приводить к существенной экологической нагрузке. Одним из способов решения данной проблемы является выделение и фракционирование белков, эффективность которых существенно зависит от применяемого метода. В работе проведена сравнительная оценка четырех способов обработки восстановленной подсырной сыворотки (массовая доля сухих веществ 6,0 %), таких как осаждение хитозаном (pH 4,5; 20 °C; 1 % геля; 20 мин), термокислотная коагуляция (pH 4,65; 90 °C; 15 мин) с использованием молочной, лимонной, ортофосфорной и соляной кислот, криокислотное осаждение (pH 4,5; минус 18 °C; 24 ч) и ультрафильтрация (спиральные мембраны с порогом отсечения 10 кДа). В ходе исследования определяли долю выделенного белка, фракционный состав растворимых азотистых соединений методом гель-фильтрации и удельные операционные затраты. Максимальную эффективность отделения белка обеспечила ультрафильтрация (65,92 ± 0,59 %), которая оказалась на порядок дешевле (≈ 112 руб/м^3) всех химических методов. Среди термокислотных вариантов наиболее эффективными показали себя лимонная (57,83 ± 0,51 %) и соляная (56,63 ± 0,55 %) кислоты. Хитозан и криокислотная обработка показали низкую общую эффективность (26,51 ± 0,20 % и 25,30 ± 0,15 % соответственно). Анализ фракционного состава супернатанта продемонстрировал, что термокислотная коагуляция и ультрафильтрация привели к полному удалению β-лактоглобулина и БСА. Осаждение хитозаном обеспечило сохранение нативного профиля всех основных сывороточных белков и способствовало удалению лишь балластных примесей. Криокислотный метод продемонстрировал уникальную селективность, практически полное удаление пептидов при сохранении нативных α-лактальбумина и β-лактоглобулина. Предложена поэтапная стратегия фракционирования: обработка хитозаном для удаления примесей, отделение пептидов криокислотным способом с последующим выделением нативных белков ультрафильтрацией или термокислотным методом.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Статья подготовлена в рамках выполнения исследований по государственному заданию № FGUS-2024-0007 Федерального научного центра пищевых систем им. В. М. Горбатова Российской академии наук.

Received 05.05.2026
Accepted in revised 06.06.2026
Accepted for publication 10.06.2026
© Mamykin D. S., Shukhalova O. M., Volkova T. A., Borodina U. V., Grigorieva A. I., 2026

Available online at https://www.fsjour.com/jour
Original scientific article
Open access

EVALUATION OF CHEESE WHEY PROTEIN PRECIPITATION METHODS BASED ON EFFICIENCY AND FRACTIONAL COMPOSITION

Denis S. Mamykin*, Olga M. Shukhalova, Tatiana A. Volkova, Ulyana V. Borodina, Anastasia I. Grigorieva

All-Russian Scientific Research Institute of Butter- and Cheesemaking, Uglich, Yaroslavl Region, Russia

KEYWORDS:
whey proteins, chitosan, denaturation, acid-base coagulation, isoelectric precipitation

ABSTRACT

Cheese whey is a large-scale by-product of milk processing, characterized by high biological value. However, its irrational use can lead to a serious environmental burden. One of the ways to solve this problem is the isolation of proteins and their fractionation, the efficiency of which significantly depends on the method used. In this work, a comparative assessment of four methods of processing reconstituted cheese whey (6.0 % dry matter mass fraction) was carried out, such as chitosan precipitation (pH 4.5; 20 °C; 1 % gel; 20 min), thermal acid coagulation (pH 4.65; 90 °C; 15 min) using lactic, citric, phosphoric and hydrochloric acids, cryo-acid precipitation (pH 4.5; –18 °C; 24 h) and ultrafiltration (spiral membranes with a cutoff threshold of 10 kDa). The study determined the proportion of precipitated protein, the fractional composition of soluble nitrogenous compounds using gel filtration, and specific operating costs. Ultrafiltration provided the highest efficiency of protein separation (65.92 ± 0.59 %), which also turned out to be an order of magnitude cheaper (≈112 rubles/m^3) than all chemical methods. Among the thermal acid options, citric (57.83 ± 0.51 %) and hydrochloric (56.63 ± 0.55 %) acids proved to be the most effective. Chitosan and cryo-acid treatment showed low overall efficiency (26.51 ± 0.20 % and 25.30 ± 0.15 %, respectively). Analysis of the fractional composition of the supernatant showed that thermal acid coagulation and ultrafiltration completely removed β-lactoglobulin and BSA. Chitosan precipitation preserved the native profile of all major whey proteins, removing only ballast impurities. The cryoacid method demonstrated unique selectivity, virtually completely removing peptides while preserving native α-lactalbumin and β-lactoglobulin. A step-by-step fractionation strategy is proposed: treatment with chitosan to remove impurities, cryoacid separation of peptides, followed by isolation of native proteins by ultrafiltration or the thermal acid method.

FUNDING: The article was prepared as part of research carried out on a government assignment № FGUS-2024–0007 V. M. Gorbatov Federal Research Center for Food Systems of the Russian Academy of Sciences.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: **Мамыкин, Д. С., Шухалова О. М., Волкова, Т. А., Бородина, У. В., Григорьева, А. И.** (2026). Оценка методов осаждения белков подсырной сыворотки по эффективности и фракционному составу. *Пищевые системы*, 9(2), 306–315. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2026-9-2-306-315

FOR CITATION: **Mamykin, D. S., Shukhalova, O. M., Volkova, T. A., Borodina, U. V., Grigorieva, A. I.** (2026). Evaluation of cheese whey protein precipitation methods based on efficiency and fractional composition. *Food Systems,* 9(2), 306–315. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2026-9-2-306-315

1. Введение

Подсырная сыворотка является побочным продуктом переработки молока, образующимся в процессе производства сыра. Ее объем составляет от 80 до 90% (в зависимости от технологических факторов и типов сыра) от общего объема молока, направленного на производство сыра [1–3]. Согласно экономическим прогнозам, к 2030 году ежегодный объем образования сыворотки в мире может достичь от 203 до 241 миллионов тонн [2]. Непереработанная подсырная сыворотка представляет серьезную угрозу для окружающей среды и создает экономические проблемы для перерабатывающих предприятий агропромышленного комплекса1 [4–6]. Сточные воды сыродельных предприятий, содержащие подсырную сыворотку, зачастую не подвергаются первичной обработке и направляются на централизованные очистные сооружения или поля фильтрации, что влечет значительные финансовые затраты по их очистке [6]. Более того, при попадании молочной сыворотки в водоемы высокое содержание в ней легкоокисляемых органических соединений приводит к снижению концентрации растворенного кислорода, а белковые частицы могут вызывать процессы гниения, нанося вред водным организмам и окружающей среде в целом [6–8].

Наряду с проблемой утилизации актуальным является вопрос вторичного использования подсырной сыворотки, обусловленный ее высокой биологической ценностью. Перешедшие в сыворотку составные части молока включают половину сухих веществ исходного сырья, при этом энергетическая ценность достигает 37% [1,3,4,6]. Несмотря на потерю наиболее калорийных компонентов (жира и казеина), подсырная сыворотка является богатым источником биологически активных компонентов, в особенности белков [1,9], среднее содержание которых может доходить до 1% [4].

Белковый состав сыворотки представлен преимущественно β-лактоглобулином (β-Lg), составляющим 50–55% от общего белка, и α-лактальбумином (α-La) с долей 20–25% [10]. Помимо них в подсырной сыворотке присутствуют гликомакропептиды (GMP), бычий сывороточный альбумин (BSA), иммуноглобулины (Ig), лактоферрин (LF), лактопероксидаза (LP), протеозо-пептоны (PP) и др. [4,6,11–14]. Гликомакропептиды содержатся только в подсырной сыворотке, образующейся при производстве сыров с использованием молокосвертывающих ферментных препаратов [14].

Выделение и концентрирование белковых компонентов является основой современной переработки сыворотки. Так, рациональное использование подсырной сыворотки позволяет применять ее в качестве сырья для производства сывороточных белков в виде сухой сыворотки (8–12% белка), концентратов (КСБ, 35–80% белка), изолятов (ИСБ, до 90% белка), гидролизатов (ГСБ, менее 80% белка) и отдельных белковых фракций [3,11–17]. В частности, отдельные фракции и высокоочищенные белки, полученные из подсырной сыворотки, могут использоваться в качестве ингредиентов для специализированного питания, в том числе детского, спортивного и геродиетического [14,18–20], фармацевтических препаратов [14,21] и других пищевых продуктов [14,18], а также для производства пленок для упаковки (например, сыра) [22]. Поскольку эффективность и область применения конечных продуктов напрямую зависят от состава и свойств выделенных белков, возникает необходимость в выборе оптимальных методов их фракционирования. По типу движущей силы все методы осаждения, концентрирования и фракционирования подсырной сыворотки можно разделить на несколько групп:

- ❑ баромембранные;
- ❑ электромембранные;
- ❑ термические;
- ❑ диффузионные;
- ❑ хроматографические;
- ❑ иммуномагнитные;
- ❑ гибридные.

Баромембранные методы, движущей силой которых является избыточное давление, включают обратный осмос, нанофильтрацию, ультрафильтрацию, микрофильтрацию и диафильтрацию. Обратный осмос позволяет концентрировать все компоненты сухого остатка сыворотки, в том числе сывороточные белки, при этом образуется высокоочищенный пермеат, который можно использовать как техническую воду. Процесс проводят при температуре (29±1) °C и давлении (2,9±0,3) МПа, повышая содержание сухих веществ до 20% [23–26]. Нанофильтрация (размер пор 1–10 нм, давление 1,5–2,5 МПа) позволяет одновременно концентрировать сыворотку до 24% сухих веществ и проводить частичную деминерализацию (удаление до 40% одновалентных ионов) [26,27]. При помощи ультрафильтрации с использованием мембран с порогом отсечения 10 кДа, при температуре ниже 50–55 °C и давлении 0,1–1,0 МПа получают сывороточные белковые концентраты с содержанием белка 35–80% [26,27]. Однако основным ограничением ультрафильтрации считается низкая селективность при разделении α-La (14 кДа) и β-Lg (18 кДа). В одноступенчатых процессах чистота α-La достигает лишь 40–60% [14]. Для решения этой проблемы применяют комбинацию ультрафильтрации с другими методами, в частности микрофильтрацию (размер пор 0,1–10 мкм, 50–55 °C, TMP 0,1–1,0 бар). Микрофильтрация обеспечивает эффективную предварительную обработку сыворотки с удалением казеиновой пыли, жира и бактерий [9,26]. Дополнительно для повышения чистоты белковых изолятов используют диафильтрацию, позволяющую вымывать лактозу и минеральные вещества и повышать массовую долю белка в сухом веществе до 90% [26].

Методы, основанные на использовании электрического поля (электромембранные), включают электродиализ, электроультрафильтрацию, электродиализ с ультрафильтрационными мембранами и биполярный электродиализ. Классический электродиализ служит предварительной стадией деминерализации для подготовки сыворотки к последующей электроультрафильтрации [28]. Электроультрафильтрация позволяет достичь фактора разделения лактоферрина и α-лактальбумина, равного 9,1, при этом требует высокого энергопотребления и предварительного обессоливания [28]. Электродиализ с ультрафильтрационными мембранами обеспечивает перенос лактоферрина из сыворотки в среднем до 15% (в модельных растворах до 46%), но ограничен адсорбцией белков на мембранах [14,28]. Биполярный электродиализ при снижении уровня активной кислотности в сыворотке до 5,0 ед. pH обеспечивает осаждение более 90% β-лактоглобулина с чистотой до 98%, при этом характеризуется неполным разделением α-La и β-Lg [14,28].

Термические методы, основанные на температурном градиенте, включают простую термическую коагуляцию, кислотно-термическую коагуляцию, термокальциевое осаждение, селективное осаждение и криоконцентрирование. Простая термическая коагуляция (90–95 °C, 5–20 мин) обеспечивает выход 20–40%, но при этом вызывает необратимую денатурацию белков и потерю растворимости [3,9,26,27,29]. Кислотно-термическая коагуляция (pH 4,5 ед., 90–95 °C) более эффективна, так как эффективность отделения белковых фракций достигает 40–55% [3,29,30]. Еще более высокую степень выделения белка (60–65%) обеспечивает безреагентный метод А. Г. Храмцова, в котором используют обезжиренное молоко (сквашенное бактериальными культурами до 120 °T, 30% от массы смеси, нагрев до 90 °C) [31]. Другим подходом является термокальциевое осаждение (50 °C, pH 7,3–7,5 ед., ионы Ca^{2+}), которое позволяет осадить α-La, β-Lg и другие белки [26]. Для селективного выделения α-лактальбумина применяют осаждение с использованием тринатрийцитрата (60 г/л, 50 °C, pH 3,4 ед., 120 мин), который обеспечивает чистоту α-La 91,3% [32]. Наряду с тепловыми методами, принципиально иной подход представляет криоконцентрирование, который включает в себя 4 цикла заморозки и позволяет сконцентрировать сухие вещества до 35% при содержании белковых фракций до 20% [3,16,33].

Еще один принцип разделения основан на использовании химического потенциала (концентрационного градиента) — это так называемые диффузионные методы, к которым относятся высаливание, двухфазная экстракция, осаждение хитозаном, полиакриловой и трихлоруксусной кислотами. Высаливание 7% NaCl при pH 2,0 ед. обеспечивает выход β-лактоглобулина до 68% при чистоте на уровне 80% [34]. Более высокую эффективность демонстрирует двухфазная экстракция с использованием полиэтиленгликоля (PEG), которая позволяет выделить до 99% β-Lg (чистота до 95%) и α-La до 97% (чистота до 91%), однако после фракционирования требует удаления PEG [14,26].

Отдельную группу представляют методы осаждения полимерами и кислотами. Осаждение хитозаном при оптимальных условиях позволяет выделить до 90% β-лактоглобулина. Однако метод имеет ограничения, такие как критичность к ионной силе, ингибирование ионами кальция, а также эффективность только на сыворотке с низкой кислотностью2 [26,35]. Что касается осаждения кислотами, то полиакриловая кислота позволяет неселективно осадить до 70% белковых фракций, а трихлоруксусная кислота — до 87% [26].

Принципиально иной подход к разделению белков реализован в хроматографических методах (ионообменная, аффинная и мем-

[1] Залашко, М. В., Залашко, Л. С. (1976). Микробный синтез на молочной сыворотке. Минск: Наука и техника. — 274 с.

[2] Алиева, Л. Р. (2021). Научно-практические аспекты направленной биотрансформации белковой системы молока катионным полисахаридом хитозаном для создания технологий молочных продуктов здорового питания [Автореферат диссертации]. Ставрополь: Северо-Кавказский федеральный университет.

бранная хроматография), где разделение происходит за счет сорбционного взаимодействия. Ионообменная хроматография демонстрирует высокие показатели выхода лактоферрина (эффективность до 77 % и чистота до 89 %), лактопероксидазы (эффективность до 92 % и чистота до 99 %) и α-лактальбумина (эффективность до 80 % и чистота до 97 %). Однако для β-лактоглобулина чистота доходит максимально до 50 % из-за близости изоэлектрических точек, при этом метод требует подбора буферов и имеет низкую производительность [14]. Аффинная хроматография обеспечивает чистоту лактоферрина > 95 %, α-лактальбумина — до 90 %, β-лактоглобулина — до 96 % и лактопероксидазы 0 до 80 %. При этом она ограничена высокой стоимостью лигандов и сложностью масштабирования [14]. Мембранная хроматография позволяет удалять до 96 % β-Lg и повышает чистоту α-La, лактоферрина, иммуноглобулина выше 90 % при высокой производительности. Недостатки — низкая емкость, концентрационная поляризация и деградации мембран [14,36].

Альтернативным подходом является магнитная сепарация, основанная на иммобилизации специфических лигандов на магнитных наночастицах — иммуномагнитные методы. Для лактоферрина достигнута связывающая способность до 164 мг/г носителя. Однако десорбция целевого белка требует жестких условий, что приводит к его денатурации [14].

Учитывая ограничения как традиционных, так и специализированных методов, все большее внимание привлекают комбинированные (гибридные) подходы, позволяющие объединить преимущества разных принципов разделения и минимизировать их недостатки. Так, комбинация термической обработки, микрофильтрации и ультрафильтрации позволяет обеспечивать чистоту α-La до 91,3 % и β-Lg до 97,2 % [14]. Сочетание ультрафильтрации и высокого давления для молочной сыворотки позволяет выделить β-Lg > 80 % и обеспечить степень очистки α-La > 80 % [37]. Комбинация ферментативного гидролиза и ультрафильтрации позволяет получить α-La с чистотой до 95 % [14].

Таким образом, проведенный анализ литературных данных свидетельствует о том, что существующие методы выделения белков подсырной сыворотки обладают различными ограничивающими их применение недостатками, такими как низкая селективность, необратимая денатурация, высокая стоимость. Однако большинство опубликованных научных данных получены в различающихся условиях, что не позволяет напрямую сопоставить методы между собой по ключевым критериям, таким как доля осажденного белка, фракционный состав остаточных растворимых соединений и экономические затраты. В связи с этим необходима прямая сравнительная экспериментальная оценка.

Цель данного исследования — экспериментально определить эффективность выделения сывороточных белков, изменение фракционного состава растворимых азотистых соединений и удельные экономические затраты при использовании различных методов выделения в идентичных условиях.

2. Материалы и методы

Объектами исследования являлись восстановленная дистиллированной воде подсырная сыворотка (ООО «Армада Плюс», г.о. Красногорск, Россия) с массовой долей сухих веществ (6,0 ± 0,1)%, исходная и очищенная от белковых фракций (сыворотка осветленная); растворы органических и неорганических кислот в качестве осадителя белковых фракций — ортофосфорная, соляная, молочная, лимонная (ООО «Химпром-М», г. Ярославль, Россия); раствор хитозана (ООО Объединенная компания «ОК», г. Волгоград, Россия).

Выполнен обзор доступных научных литературных источников, соответствующих тематике. Для систематического поиска информации привлекались как международные, так и российские библиографические платформы и репозитории: PubMed (биомедицинская база данных Национального центра биотехнологической информации США), ScienceDirect (издательство Elsevier, Нидерланды), Академия Google (Google Scholar), а также электронные библиотеки eLibrary.ru и «КиберЛенинка».

Для приготовления модельного раствора подсырной сыворотки с массовой долей сухих веществ 6,0 % использовали сухую подсырную сыворотку. Навеску сухого продукта массой (60,0 ± 0,1) г растворяли в дистиллированной воде, нагретой до температуры (40 ± 1) °С, при постоянном перемешивании до полного исчезновения видимых частиц. Объем доводили до 1,0 дм^3 дистиллированной водой. Восстановленную сыворотку фильтровали через бумажный фильтр для удаления нерастворившихся частиц и использовали далее для экспериментов по осаждению белков.

Для исследования осаждения белковых фракций молочной сыворотки использовали 2 % раствор гель-хитозана. Его готовили путем растворения 1 г сухого хитозана в 100 см^3 2 % раствора уксусной кислоты (2 см^3 кислоты на 98 см^3 воды). Смесь перемешивали (75 ± 5) минут при комнатной температуре до получения однородного прозрачного геля без комков. Затем доводили гель-хитозан до значений pH (6,65 ± 0,05) 30 %-ным раствором щелочи NaO H. Хранили в закрытой таре при температуре (4,0 ± 1,0) °С не более 3 суток. Восстановленную подсырную сыворотку доводили до температуры (20 ± 1) °С и при перемешивании вносили в нее подготовленный гель хитозана из расчета 10 см^3 геля на 1 дм^3 сыворотки. Далее активную кислотность смеси доводили до значения pH (4,50 ± 0,05) ед. pH путем добавления раствора молочной кислоты (концентрация 80 %). Смесь выдерживали без перемешивания в течение (20,0 ± 0,1) мин при температуре (20 ± 1) °С (Вариант 1). По истечению времени образец фильтровали через бумажный фильтр для отделения осажденных белковых соединений. Фильтрат собирали для дальнейшего анализа.

Для исследования процесса термокислотного осаждения сывороточных белков были выбраны кислоты различной природы: неорганические (соляная, ортофосфорная) и органические (молочная, лимонная). Активную кислотность восстановленной подсырной сыворотки доводили до pH (4,65 ± 0,05) ед. pH путем пошагового добавления соответствующей кислоты:

- Вариант 2–80,0 % молочная кислота ($CH_3CH(OH)COOH$);
- Вариант 3–99,5 % лимонная кислота ($C_6H_8O_{7\times}H_2O$);
- Вариант 4–85,0 % ортофосфорная кислота (H_4PO_4);
- Вариант 5–35,0 % соляная кислота (HCl).

Подкисленную восстановленную подсырную сыворотку нагревали до температуры (90 ± 1) °С при непрерывном перемешивании и выдерживали при (90 ± 1) °С в течение (15,0 ± 0,1) мин без перемешивания. По окончании выдержки смесь охлаждали до 20–25 °С. После охлаждения образцы фильтровали через бумажный фильтр для отделения осажденных белковых соединений. Фильтрат собирали для дальнейшего анализа.

Оценку влияния осаждения сывороточных белков криокислотным способом проводили путем осаждения сывороточных белков методом комбинированного воздействия низких значений pH и отрицательных температур. Активную кислотность восстановленной сыворотки доводили до значения pH (4,50 ± 0,05) ед. pH путем добавления раствора молочной кислоты (концентрация 80 %). Подкисленные образцы сыворотки помещали в морозильную камеру с установленной температурой минус (18,0 ± 1,0) °С. Продолжительность выдержки при данной температуре составила (24,0 ± 0,1) часа. По истечении времени замораживания образцы извлекали из морозильной камеры и оставляли для дефростации при комнатной температуре (23,0 ± 1,0) °С до полного перехода в жидкое состояние (Вариант 6). Полностью размороженные образцы фильтровали через бумажный фильтр для отделения осажденных сывороточных белков. Фильтрат собирали для дальнейшего анализа.

Для фракционирования белков подсырной сыворотки использовали пилотную ультрафильтрационную установку (УФ) UFALIMA BIS 10000 (ALIMA-BIS Food Processing Technology, Польша). Установка оснащена спиральными мембранными модулями с мембраной типа KOCH NF Dairy-PR O. Эксперименты проводили на двух технологических контурах. Контур 1 NF: толщина прокладки канала — 31 mil (0,787 мм), количество модулей — 4, каждый модуль содержал 3 мембранных элемента. Общая рабочая площадь мембран составляла 198 м^2. Давление на входе в контур поддерживали на уровне 6,5 бар, температура сыворотки в процессе составляла (5,7 ± 0,5) °С. Контур 2 NF: толщина прокладки канала — 31 mil (0,787 мм), количество модулей — 3, по 3 мембраны в каждом, общая площадь 148 м^2. Давление на входе — 6,5 бар, температура сыворотки — (7,5 ± 0,5) °С. Перед началом работы мембраны предварительно промывали и калибровали согласно инструкции производителя. Сыворотку подавали из сборной емкости с помощью насоса высокого давления. Фильтрацию проводили в режиме периодического концентрирования. Пермеат собирали для дальнейшего анализа (Вариант 7).

В восстановленной подсырной сыворотке и осветленной сыворотке определяли массовую долю общего белка методом Кьельдаля по ГОСТ Р 54662–2011[3].

Изменения в количественном и качественном составе белковых фракций оценивали по пептидным профилям, которые получали методом гель-фильтрации высокого разрешения на приборе AKTA pure 25 (Швеция) с использованием хроматографической колонки Superose 6 Increase 10/300 GL (Cytiva, Швеция). Подготовка образца для гель-фильтрации включала взятие навески пробы, растворение ее в растворе буфера, отделение нерастворимых в воде

[3] ГОСТ Р 54662–2011 Сыры и сыры плавленые. Определение массовой доли белка методом Кьельдаля. М.: Стандартинформ, 2012. — 15 с.

фракций фильтрованием или центрифугированием. Скорость подачи элюента составляла 0,5 см³/мин, элюент — водный раствор 0,01 M Na_2HPO_4*$12H_2O$, 0,14M NaCl. Длина волны детектора — 280 нм. Калибровку колонки проводили по времени выхода белковых веществ с известной молекулярной массой: IgG (180 кДа), альдолаза (158 кДа), BSA (69 кДа), овальбумин (43 кДа), β-Lg (36,0 кДа), α-La (14,4 кДа), цитохром С (12,3 кДа), триптофан (0,204 кДа). Калибровочный график был построен на основе логарифмической регрессионной модели[4].

Расчет доли осаждения белка проводили по формуле 1:

$$k = \frac{w_1 - w_2}{w_1} \times 100\%, \quad (1),$$

где: k — доля осаждения белка, %; w_1 — массовая доля общего белка в подсырной сыворотке, %; w_2 — массовая доля общего белка в осветленной подсырной сыворотке, %.

Расчет экономических затрат на переработку 1 м³ подсырной сыворотки различными методами проводился на основе моделирования технологического процесса и калькуляции прямых операционных расходов. В расчете учитывались следующие ключевые компоненты: энергозатраты на термообработку (нагрев, выдержка) или криообработку (охлаждение, заморозка, хранение); стоимость расходных материалов, главным образом, реагентов-осадителей (хитозан, кислоты). Расчет не учитывал амортизационные отчисления на используемое оборудование и затраты на человеческий труд (человеко-часы), так как исследование было сфокусировано на сравнении технологических режимов.

Расчет необходимой тепловой энергии ($Q_{нагрев}$) для нагрева 1 м³ сыворотки от начальной температуры (T_0) до заданной технологической температуры (T_1) производился по формуле 2:

$$Q_{нагрев} = m \times c \times \Delta T, \quad (2)$$

где: $Q_{нагрев}$ — количество необходимой тепловой энергии, кДж; m — масса продукта, принимаемая как 1024 кг для 1 м³, исходя из средней плотности сыворотки (1024 кг/м³), кг; c — удельная теплоемкость сыворотки, принятая равной 3,9 кДж/(кг·°С) на основании литературных данных, кДж/(кг·°С); ΔT — разность между заданной технологической температурой и начальной, °С.

Для учета энергии, затрачиваемой на поддержание температуры в течение времени выдержки, рассчитывались теплопотери в окружающую среду через стенки термостатированного танкера по формуле 3:

$$Q_{пот} = k \times S \times \Delta T' \times t_{выд}, \quad (3)$$

где: $Q_{пот}$ — количество энергии, затрачиваемой на поддержание температуры в течение времени выдержки, кДж; k — коэффициент теплопередачи изоляции танкера, принятый за 0,35 Вт/(м²·°С) для стандартного промышленного оборудования, Вт/(м²·°С); S — площадь поверхности теплообмена танкера объемом 1 м³, рассчитанная геометрически (≈ 5,65 м²), м²; $\Delta T'$ — разность температур между продуктом и окружающей средой, °С; $t_{выд}$ — время выдержки, с.

Суммарные энергозатраты переводились в киловатт-часы (кВт·ч) с учетом коэффициента полезного действия (КПД) теплообменного оборудования, принятого за 0,95 для электрических нагревателей.

Расчет необходимой энергии на охлаждение до точки замерзания проводили по формуле 4:

$$Q_1 = m \times c \times (T_{нач} - 0), \quad (4)$$

где: Q_1 — количество необходимой энергии на охлаждение до точки замерзания, кДж; m — масса продукта, принимаемая как 1024 кг для 1 м³, исходя из средней плотности сыворотки (1024 кг/м³), кг; c — удельная теплоемкость сыворотки, принятая равной 3,9 кДж/(кг·°С) на основании литературных данных, кДж/(кг·°С); $T_{нач}$ — начальная температура подсырной сыворотки, °С.

Расчет необходимой энергии на заморозку проводили по формуле 5:

$$Q_2 = m \times L, \quad (5)$$

где: Q_2 — количество необходимой энергии на заморозку, кДж; m — масса продукта, принимаемая как 1024 кг для 1 м³, исходя из средней плотности сыворотки (1024 кг/м³), кг; L — удельная теплота кристаллизации сыворотки, принятая за 280 кДж/кг.

Дополнительно рассчитывались затраты на компенсацию теплопритоков при хранении в течение 24 часов по формуле, аналогичной $Q_{пот}$ (формула 3), но с использованием коэффициента k для морозильного оборудования (0,2 Вт/(м²·°С)) и соответствующей ΔT. Эффективность холодильной установки характеризовалась холодильным коэффициентом (COP). Суммарные теплопотери были пересчитаны в фактическое электропотребление, где COP принят равным 2,2.

Стоимость энергоресурсов и реагентов были приняты: тариф на электроэнергию — 7,0 руб. за 1 кВт·ч, что соответствовало среднерыночным промышленным тарифам; стоимость реагентов (хитозан, кислоты) рассчитывалась исходя из их розничных оптовых цен, процентного расхода или фактического расхода.

Итоговые затраты на переработку 1 дм³ сыворотки по каждому исследуемому варианту определялись суммированием затрат на электроэнергию и реагенты.

Достоверность полученных данных подтверждалась проведением экспериментов не менее чем в 3-кратной повторности. Для каждого метода проводилась оценка погрешности, которая складывалась из погрешностей измерения объемов, температур, времени и колебаний рыночных цен на реагенты и электроэнергию. Для статистического анализа использовали стандартные методы, реализованные в программе Microsoft Excel и в программной среде R (версия 4.3.1) с использованием пакетов prcomp и RColorBrewer. Для визуализации взаимосвязи между удельными экономическими затратами и долей осажденного белка построена диаграмма рассеяния. Оценку наличия статистически значимых различий между группами методов предварительно проводили с помощью однофакторного дисперсионного анализа (ANOVA), после чего применяли апостериорный тест Тьюки, статистически значимыми считали различия при $p < 0,05$. Анализ главных компонент (PCA) проводили на матрице, включающей значения всех идентифицированных белковых фракций для трех повторностей каждого из пяти исследуемых образцов (исходная сыворотка, осветленная сыворотка после хитозана, термокислотной коагуляции, криокислотного осаждения, ультрафильтрации). Данные центрировали и масштабировали (приводили к единичной дисперсии). Вычисление главных компонент выполняли с использованием сингулярного разложения. Результаты визуализированы в виде графика координат объектов в пространстве первых двух главных компонент, где каждая группа образцов обведена окружностью, охватывающей все три повторности. Результаты представлены в форме «среднее значение ± стандартное отклонение» ($n = 3$).

3. Результаты и обсуждение

В ходе экспериментальной работы проведена сравнительная оценка семи способов обработки подсырной сыворотки, различающихся по физико-химическому принципу воздействия на белковую фазу: осаждение хитозановым гелем (Вариант 1), термокислотная коагуляция (Варианты 2–5), криокислотное осаждение (Вариант 6), а также ультрафильтрация (Вариант 7) как референтный мембранный метод. Для каждого из исследованных вариантов определяли два ключевых параметра, характеризующих технологическую и экономическую эффективность. Полученные данные систематизированы и приведены в Таблице 1.

Таблица 1. **Эффективность отделения белка и экономические затраты при различных способах осаждения**

Table 1. **Efficiency of protein separation and economic costs at different precipitation methods**

№ варианта	Способ осаждения белка	МД белка в сыворотке до отделения, %	Доля осаждения белка, %	Затраты на переработку 1 м³ сыворотки*, руб.
1	Хитозановый	0,83 ± 0,03	26,51 ± 0,20^a	1156,1 ± 11,6^a
2	Термокислотный (молочная кислота)		51,81 ± 0,57^b	887,4 ± 8,9^b
3	Термокислотный (лимонная кислота)		57,83 ± 0,51^c	727,8 ± 7,3^b
4	Термокислотный (ортофосфорная кислота)		53,01 ± 0,50^b	787,9 ± 7,9^b
5	Термокислотный (соляная кислота)		56,63 ± 0,55^c	679,3 ± 6,8^b
6	Криокислотный		25,30 ± 0,15^a	822,5 ± 8,2^b
7	Ультрафильтрация		65,92 ± 0,59^d	111,9 ± 15,3^d

Примечание: результаты представлены в форме «среднее значение ± стандартное отклонение» ($n = 3$).
Буквенные обозначения указывают на статистически однородные группы в рамках столбца, где образцы с одинаковыми буквами не имеют достоверных различий между собой ($p \geq 0,05$), образцы с разными буквами статистически значимо различаются ($p \leq 0,05$).

[4] Kuchroo, C. N. Soluble nitrogen in Cheddar cheese: Comparison of extraction procedures / C. N. Kuchroo, P. F. Fox // Milchwissenschaft. — 1982. — Vol. 37. — P. 331–335.

Однофакторный дисперсионный анализ (ANOVA) выявил статистически значимые различия между семью способами обработки подсырной сыворотки как по доле осажденного белка ($p < 0,001$), так и по удельным экономическим затратам ($p < 0,001$). Результаты множественных сравнений (тест Тьюки, $\alpha = 0,05$) представлены в Таблице 1 в виде буквенных индексов.

Анализ данных, представленных в Таблице 1, позволил выявить несколько устойчивых закономерностей. По эффективности осаждения ультрафильтрация (Вариант 7) статистически значимо превосходила все химические методы (Варианты 1–6). Полученные значения доли осаждения белка (65,92±0,59%) оказались несколько ниже характерных для ультрафильтрации подсырной сыворотки (80–99% [38,39]), что объясняется использованием восстановленной сыворотки (частичная агрегация белков), низкой температурой процесса (5–8 °C вместо 40–55 °C) и концентрационной поляризацией в спиральных мембранных модулях. При этом по сравнению с химическими методами ультрафильтрация остается значительно более эффективной.

Среди термокислотных вариантов образцы с лимонной (Вариант 3) и соляной кислотами (Вариант 5) образовали наиболее эффективную подгруппу (c), тогда как молочная (Вариант 2) и ортофосфорная кислоты (Вариант 4) давали достоверно более низкие показатели (b). Отмеченное различие объясняется разной буферной емкостью кислот, что ранее отмечено в работах по термокоагуляции [27,30]. Наименее эффективными оказались хитозановое (Вариант 1) и криокислотное осаждение (Вариант 6), которые между собой не различались (a, $p \geqslant 0,05$). Низкая эффективность хитозана в исследуемых условиях согласуется с данными, полученными при селективном осаждении хитозаном конкретной белковой фракции [35,40].

По удельным затратам ультрафильтрация (Вариант 7) оказалась на порядок дешевле любого химического метода. Среди химических способов хитозан (Вариант 1) являлся самым дорогим и образовал отдельную статистическую группу, тогда как все остальные методы попали в одну однородную группу. Таким образом, внутри группы химических методов отсутствует прямая зависимость между стоимостью и эффективностью: самый дорогой метод обеспечивает одну из самых низких эффективностей, а более дешевые — вдвое более высокий выход белка.

Для визуального исследования возможной связи между затратами и эффективностью по данным Таблицы 1 построили диаграмму рассеяния (Рисунок 1). Как видно из графика (Рисунок 1А), выделялось обособленное положение ультрафильтрации (Вариант 7) за счет минимальных затрат и максимальной эффективности. Остальные шесть методов расположены в правой части поля рассеяния с более высокими затратами и вариабельной эффективностью, при этом внутри этой группы точки распределены хаотично, без выраженной закономерности.

Количественную оценку монотонной связи дал коэффициент ранговой корреляции Спирмена. При включении всех семи методов (Рисунок 1А) получена статистически значимая отрицательная корреляция, указывающая на то, что в целом снижение затрат сопровождалось повышением доли извлеченного белка. Однако высокая отрицательная связь полностью обусловлена включением в расчет ультрафильтрации. После ее исключения (Рисунок 1Б) и анализа только шести методов корреляция стала статистически незначимой ($\rho = — 0,771$; $p = 0,1028$). Следовательно, внутри группы химических способов осаждения отсутствовала достоверная зависимость между экономическими затратами и эффективностью осаждения белка.

Таким образом, проведенный анализ показал, что выбор способа обработки подсырной сыворотки не может определяться только двумя критериями. Решающее значение приобретает селективность метода — его способность преимущественно осаждать определенные белковые фракции, сохраняя при этом в растворе другие ценные компоненты в нативном состоянии. В связи с этим следующим этапом работы являлось исследование фракционного состава водорастворимых азотистых соединений, остающихся в осветленной сыворотке после каждого вида обработки (Рисунок 2 и Таблица 2). Поскольку предварительный анализ показал, что фракционный состав водорастворимых азотистых соединений, остающихся в осветленной сыворотке после термокислотного осаждения (Варианты 2–5), не зависел от вида использованной кислоты, в дальнейшем для этого способа приведены данные, полученные с использованием молочной кислоты (Вариант 2). Она рассматривается как репрезентативный представитель группы термокислотных методов.

Исследование методов осаждения белка из подсырной сыворотки позволило не только оценить их общую эффективность и экономику, но и определить ценность каждого подхода для решения задачи пофракционного разделения белков. Исходный состав водорастворимого белка подсырной сыворотки (Рисунок 2 и Таблица 2) представлял собой сложную композицию, где основными целями для выделения могут являться ценные сывороточные протеины — β-лактоглобулин и α-лактальбумин, а также фракция протеозопептонов и пептидов.

Для оценки селективности методов был проведен однофакторный дисперсионный анализ фракционного состава осветленной сыворотки. Установлено, что для всех семи фракций наблюдались статистически значимые различия между пятью методами обработки (во всех случаях $p < 0,001$).

Термокислотные способы (на примере осаждения молочной кислотой — Вариант 2) проявили себя как методы грубого разделения. При общей эффективности осаждения 52–58% (Таблица 1) они привели к денатурации и осаждению основных сывороточных белков. После термокислотной обработки β-лактоглобулин и БСА в осветленной сыворотке полностью отсутствовали, что соответствует литературным данным [41–43]. В осветленной сыворотке доля α-лактальбумина снизилась, вследствие чего удельное содержание протеозопептонов и пептидов возросло. Таким образом, термокислотный способ (Вариант 2) не подходит для получения нативных изолятов, но технологически ценен для эффективного отделения белковой массы, предназначенной для пищевых, комбикормовых или биотехнологических производств, где сохранение нативной структуры не критично [44,45].

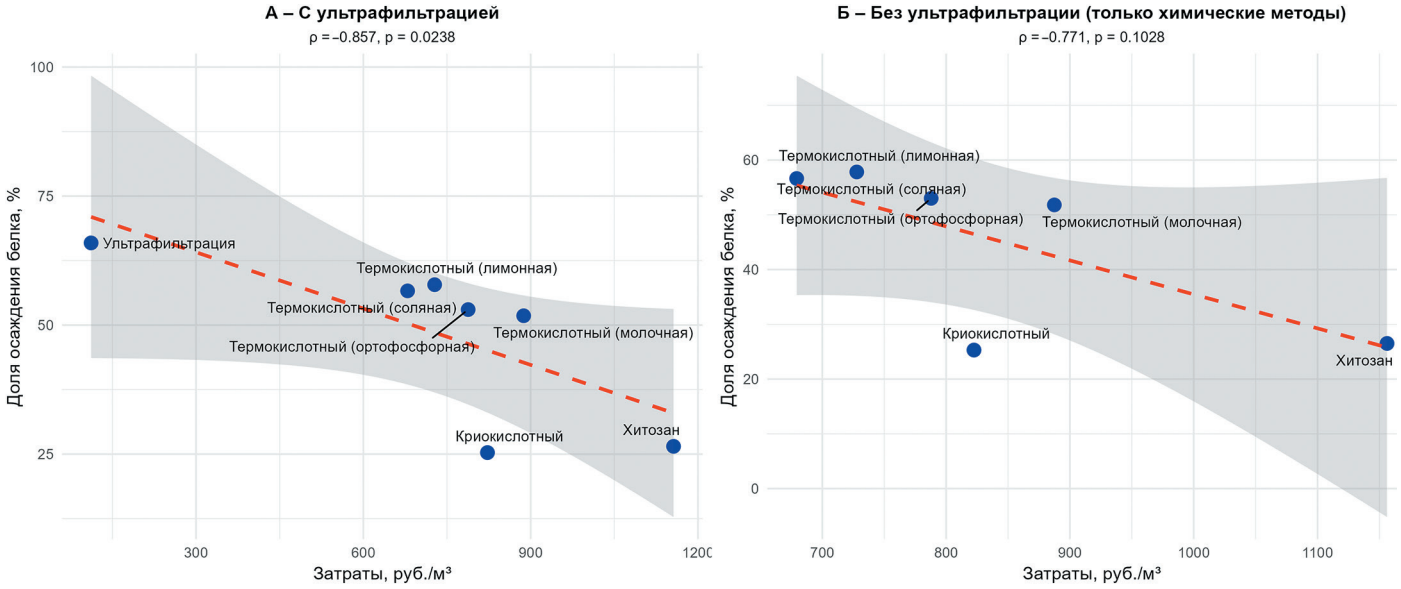


Рисунок 1. **Диаграмма рассеяния зависимости доли осажденного белка от удельных затрат на переработку подсырной сыворотки (А - с учетом всех методов (Варианты 1–7), Б — без учета ультрафильтрации (Варианты 1–6))**

Figure 1. **Scatter plot of the dependence of the proportion of precipitated protein on the specific costs of the cheese whey processing (А - with regard to all methods (variants 1–7), Б — without regard for ultrafiltration (variants 1–6)**

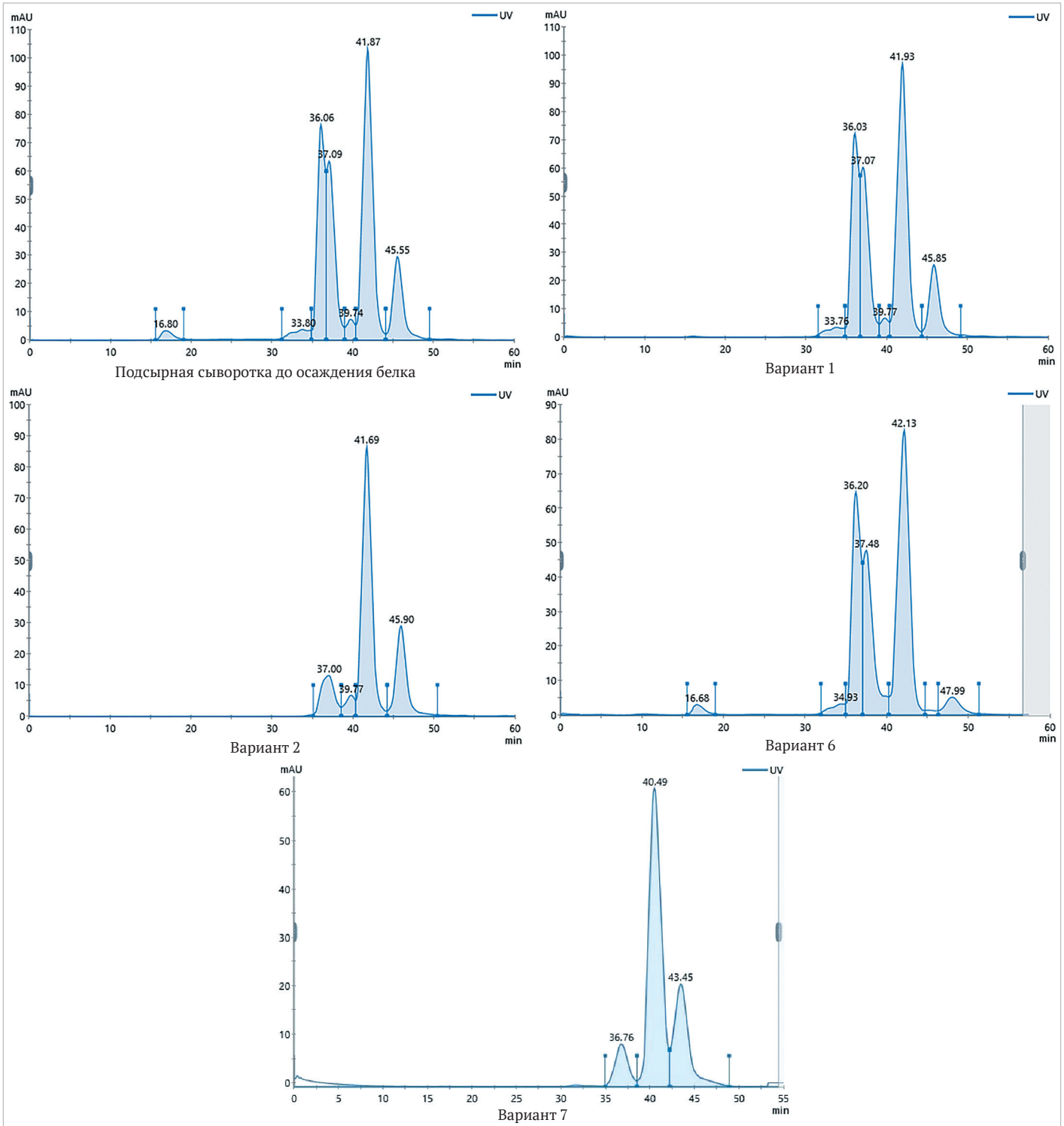


Рисунок 2. **Диаграмма молекулярно-массового распределения белковых фракций в водном экстракте осветленной сыворотки**

Figure 2. **Diagram of molecular weight distribution of protein fractions in the aqueous extract of clarified whey**

Таблица 2. **Молекулярно-массовое (ММ) распределение растворимых азотистых соединений в водном экстракте осветленной сыворотки**

Table 2. **Molecular weight (MW) distribution of soluble nitrogenous compounds in the aqueous extract of clarified whey**

Белковая фракция*	Исходная подсырная сыворотка	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 6	Вариант 7
Свободный объем, %	1,48 ± 0,15^{a}	0^{b}	0^{b}	1,55 ± 0,16^{a}	0^{b}
БСА, %	2,65 ± 0,27^{a}	2,46 ± 0,25^{a}	0^{b}	2,16 ± 0,22^{a}	0^{b}
β-лактоглобулин, %	23,23 ± 2,23^{a}	23,71 ± 2,37^{a}	0^{b}	26,81 ± 2,68^{a}	0^{b}
α-лактаальбумин, %	20,27 ± 2,07^{a}	20,70 ± 2,07^{a}	13,25 ± 1,33^{b}	22,41 ± 2,24^{a}	9,68 ± 0,97^{c}
Протеозопептоны	40,45 ± 3,38^{a}	41,95 ± 3,98^{a}	64,04 ± 5,95^{b}	43,35 ± 4,34^{a}	63,69 ± 6,37^{b}
Пептиды, %	11,92 ± 1,19^{a}	11,18 ± 1,12^{a}	22,71 ± 2,27^{b}	3,72 ± 0,37^{c}	26,63 ± 2,66^{b}

Примечание: доля от общего количества водорастворимых белковых фракций.
Результаты представлены в форме «среднее значение ± стандартное отклонение» (n = 3).
Буквенные обозначения указывают на статистически однородные группы в рамках строки, где образцы с одинаковыми буквами не имеют достоверных различий между собой ($p \geqslant 0{,}05$), образцы с разными буквами статистически значимо различаются ($p \leqslant 0{,}05$).

В противоположность термокислотному методу осаждение хитозаном (Вариант 1), несмотря на невысокую общую эффективность, показало возможности для более тонкого разделения. Статистический анализ не выявил значимых различий между показателями после обработки хитозаном и исходной сывороткой для всех фракций, за исключением полного исчезновения свободного объема. Так, количество β-лактоглобулина, α-лактальбумина, протеозопептона и пептидов осталось на уровне исходных значений ($p > 0,05$). Следовательно, хитозан осаждал преимущественно балластные примеси (сырную пыль, жировые шарики), не затрагивая нативные сывороточные белки. Полученные данные, на первый взгляд, противоречили известному факту о селективности хитозана по отношению к сывороточным белкам [31,40,46]. Однако отмеченное несоответствие обусловлено различиями в целевых задачах. В ранее опубликованных работах оптимизация условий осаждения хитозаном была направлена на достижение максимальной эффективности выделения конкретного белка (например, β-лактоглобулина) [31,40], тогда как в нашем исследовании оценивалась общая доля осажденного белка и изменение фракционного состава без предварительной оптимизации под селективное извлечение. В литературе подробно показано, что хитозан проявлял селективность в узком диапазоне параметров, прежде всего pH [40]. Так, в работе Casal E. в соавторстве с коллегами было установлено, что при pH 6,2 добавление 1,9–3,0 мг/мл хитозана приводило к полному удалению β-лактоглобулина, при этом не менее 80% остальных белков сыворотки оставались в растворе [40]. Принципиально иной механизм наблюдался в кислых условиях: так, при pH 4,5 хитозан образовывал комплексы с липидами и компонентами жировых глобул, что известно из исследований по удалению липидов из сывороточных продуктов [47]. Таким образом, наши результаты не опровергали литературные данные, а демонстрировали и подтверждали решающую роль строгого контроля условий для реализации селективного потенциала хитозана.

Наиболее интересная селективность была продемонстрирована криокислотным методом (Вариант 6). При общей эффективности осаждения (25,30±0,15)% исследуемый способ обеспечил практически полное удаление фракции пептидов. Тест Тьюки подтвердил, что криокислотный метод статистически отличается от всех остальных. В отличие от традиционного криоконцентрирования, которое не удаляет пептиды селективно, а лишь концентрирует все фракции [16], исследуемая комбинация подкисления и заморозки привела к избирательному осаждению пептидов, предположительно, содержащих высокую долю гидрофобных аминокислот (триптофан, тирозин, фенилаланин, лейцин и ряд других), которыми богаты белки сыворотки. В то же время основные глобулярные белки остались в растворе: количество β-лактоглобулина и α-лактальбумина не имели значимых отличий от исходного уровня. Сохранение нативной структуры α-лактальбумина при замораживании подтверждено в работе Cochachín-Guerra B. в соавторстве с другими исследователями [48], где показано, что in vitro перевариваемость белка после криоконцентрирования не отличается от нативного. Таким образом, криокислотная обработка была признана прямым путем для выделения и концентрирования пептидов из подсырной сыворотки с сохранением нативных сывороточных белков в супернатанте.

Ультрафильтрация (Вариант 7), использованная как референтный мембранный метод, по фракционному профилю оказалась близка к термокислотному осаждению. В результате ультрафильтрации было достигнуто полное удаление β-лактоглобулина и БСА, значительное снижение удельного количества α-лактальбумина и накопление протеозопептонов и пептидов. Это объясняется тем, что мембраны с отсечением 10 кДа задерживают большинство глобулярных белков, но пропускают протеозопептоны и пептиды с молекулярной массой менее 10 кДа [36,49]. Статистически ультрафильтрация не отличалась от термокислотного метода по большинству фракций (например, для пептидов оба имели индекс а), за исключением более низкого содержания α-лактальбумина.

Для выявления многомерных закономерностей и визуализации сходства между методами обработки по фракционному составу был выполнен анализ главных компонент (PCA). Данный метод позволил снизить размерность и оценить, какие методы близки по профилю (Рисунок 3).

В результате анализа главных компонент (Рисунок 3) четко выделялись три кластера. Первый кластер объединял исходную сыворотку и образец после осаждения хитозаном (Вариант 1). Точки этих двух групп расположены в области положительных значений PC1 и PC2, что указывало на практически полное сохранение фракционного профиля сывороточных белков после обработки хитозаном. Второй кластер образовывали термокислотное осаждение (Вариант 2) и ультрафильтрация (Вариант 7). Их точки были сконцентрированы в области отрицательных значений PC1, при этом по показателю PC2 группа термокислотного осаждения находилась в положительной области, а группа ультрафильтрации, напротив, в отрицательной. Отмеченное сходство отражало общую черту обоих методов, такую как грубое разделение, сопровождающееся полным удалением β-лактоглобулина и БСА и увеличением удельного количества протеозопептонов и пептидов. Третий кластер был представлен только криокислотным методом (Вариант 6), занимавшим область положительных значений PC1 и отрицательных значений PC2, что соответствовало уникальной селективности этого метода.

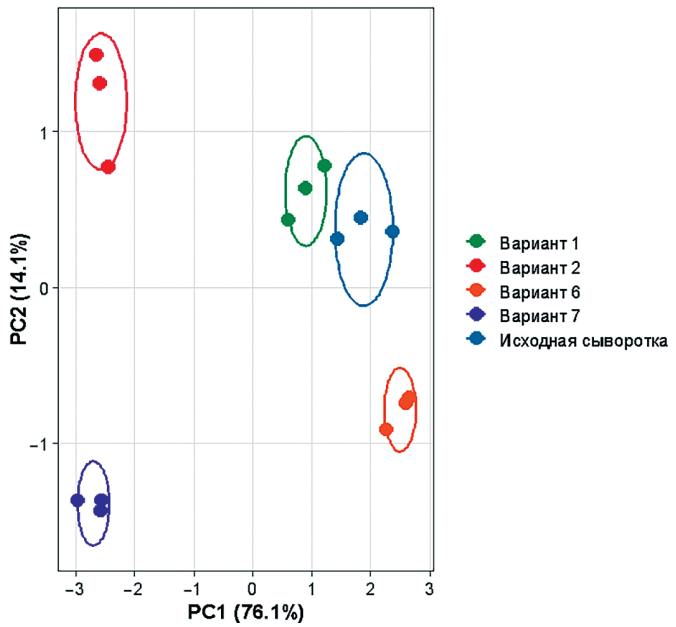


Рисунок 3. **Результаты анализа главных компонент (PCA) фракционного состава сыворотки**

Figure 3. **Results of the principal component analysis (PCA) of the fractional composition of whey**

На основании графика отмечалось, что окружности групп не перекрывались, свидетельствуя о статистически значимых различиях между фракционными профилями сывороток, осветленными различными методами. Полученные результаты анализа главных компонент согласовывались с выводами дисперсионного анализа и демонстрировали, что для поэтапного фракционирования наиболее перспективны хитозан (Вариант 1 — очистка от примесей) и криокислотный метод (Вариант 6 — удаление пептидов с сохранением нативных белков); тогда как термокислотная коагуляция (Вариант 2) и ультрафильтрация (Вариант 7) показывали сходный профиль, пригодный для получения белковых концентратов без сохранения нативной структуры.

Полученные результаты PCA согласовывались с выводами дисперсионного анализа (ANOVA) и теста Тьюки, а также демонстрировали, что для поэтапного фракционирования наиболее перспективны хитозан (очистка от примесей) и криокислотный метод (удаление пептидов с сохранением нативных белков); термокислотная коагуляция и ультрафильтрация показывали сходный профиль, пригодный для получения белковых концентратов без сохранения нативной структуры.

На основе выявленных закономерностей была предложена поэтапная стратегия фракционирования белков подсырной сыворотки. На первом этапе с помощью криокислотного метода или осаждения хитозаном возможно селективное удаление пептидов и балластных примесей при подготовке сыворотки для дальнейшей переработки. На втором этапе из осветленной сыворотки могут быть выделены целевые нативные белки. Если же задача состоит не в сохранении нативных фракций, а в максимальном извлечении белка для пищевых или кормовых целей, наиболее эффективными остаются термокислотные методы или ультрафильтрация. При этом экономические затраты коррелировали со сложностью задачи. Грубое разделение термокислотными методами обходилось в 680–890 руб./м^3, тогда как многоступенчатое выделение нативных фракций с использованием хитозана или криокислотной обработки стоило дороже — от 820 до 1150 руб./м^3, что было признано платой за селективность и сохранение биологической ценности получаемых компонентов.

Вместе с тем предложенная стратегия имеет ряд ограничений. Во-первых, осаждение хитозаном критично к ионной силе и pH сыворотки, что может потребовать предварительной корректировки состава. Во-вторых, криокислотный метод сложен в аппаратурном оформлении (низкотемпературное оборудование) и эффективен только для сыворотки с низкой исходной кислотностью. В-третьих, термокислотная коагуляция и ультрафильтрация, несмотря на высокий выход белка, не позволяют получить отдельные фракции в нативном состоянии, что ограничивает их применение в производстве функциональных ингредиентов с заданными биологическими свойствами.

Представленные в работе закономерности могут служить основой для создания гибких и гибридных схем переработки подсырной сыворотки, позволяющих в зависимости от целевого продукта выбирать наиболее эффективный и селективный метод осаждения. Дальнейшие исследования целесообразно направить на масштабирование криокислотного и хитозанового методов, оценку их совместимости с мембранными технологиями, а также на углубленный технико-экономический анализ в условиях реального производства.

4. Выводы

В результате сравнительной оценки семи вариантов обработки подсырной сыворотки, соответствующих четырем различным физико-химическим способам (осаждение хитозаном, термокислотная коагуляция с четырьмя типами кислот, криокислотное осаждение и ультрафильтрация), установлено, что максимальную эффективность отделения белка (65,92 ± 0,59 %) и минимальные удельные затраты (112 руб/м³) обеспечивает ультрафильтрация с использованием спиральных мембран с порогом отсечения 10 кДа. Полученные значения оказались несколько ниже литературных (80–99 %). Это может быть связано с использованием восстановленной сыворотки, низкой температурой процесса и с явлением концентрационной поляризации. Среди химических методов термокислотная коагуляция показала высокую эффективность (51,8–57,8 %), причем лимонная и соляная кислоты были достоверно эффективнее молочной и ортофосфорной. Данный метод вызывает полную денатурацию β-лактоглобулина и БСА, что делает его пригодным для получения белковой массы для кормовых, биотехнологических и пищевых производств, где сохранение нативной структуры не требуется. Осаждение хитозаном при исследуемых режимах продемонстрировало низкую общую эффективность (26,51 ± 0,20 %), однако при этом полностью сохранило нативный состав основных сывороточных белков (β-лактоглобулина, α-лактальбумина, протеозопептонов и пептидов) в растворе. Данный метод способствовал удалению преимущественно балластных примесей и жировых частиц, что позволяет рекомендовать хитозан для стадии предварительной очистки сыворотки перед выделением целевых нативных фракций. Отмеченная слабая селективность, вызывающая противоречие с литературными данными, объясняется различием целевых параметров. В известных работах оптимизация направлена на максимальный выход индивидуального белка (до 82 %), тогда как в настоящем исследовании оценивалась общая доля осажденного белка без специальной оптимизации, что подтверждает решающую роль строгого контроля pH и условий процесса. Наиболее интересная селективность обнаружена у криокислотного метода (pH 4,5, минус 18 °C, 24 ч). При низкой общей эффективности (25,30 ± 0,15)% он обеспечил практически полное удаление пептидов (снижение их доли с (11,92 ± 1,19)% до (3,72 ± 0,37)% при сохранении в растворе нативных β-лактоглобулина и α-лактальбумина, что открывает прямой путь для получения пептидных концентратов из подсырной сыворотки. В ходе работы подтверждено, что химические методы (термокислотная коагуляция и осаждение хитозаном) оказались существенно дороже ультрафильтрации (679–1156 руб/м³ против 112 руб/м³), при этом внутри группы химических методов отсутствует прямая корреляция между стоимостью и эффективностью осаждения белка. На основе выявленных закономерностей предложена поэтапная стратегия фракционирования: на первом этапе целесообразно использовать криокислотную обработку для удаления пептидов или осаждение хитозаном для очистки от примесей; на втором этапе — выделять нативные сывороточные белки мягкими мембранными методами либо получать белковый концентрат с помощью термокислотной коагуляции, предназначенный для пищевых, комбикормовых или биотехнологических производств, где сохранение нативной структуры не критично.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / REFERENCES

1. Vanany, I., Wangsa, I. D., Jeremi, N. A. (2024). A multi-objective mixed-integer linear model for sustainable dairy supply chain with food waste and environmental pollutants. *Process Integration and Optimization for Sustainability*, 8, 723–740. https://doi.org/10.1007/s41660-023-00382-3
2. Buchanan, D., Martindale, W., Romeih, E., Hebishy, E. (2023). Recent advances in whey processing and valorisation: Technological and environmental perspectives. *International Journal of Dairy Technology*, 76(2), 291–312. https://doi.org/10.1111/1471-0307.12935
3. Mota, J., Moura-Alves, M., Teixeira, A. F., Nóbrega, R., Lameirão, D., Gonçalves, C. (2026). From cheese whey to functional ingredients: Upcycling whey proteins for cardiovascular and immunomodulatory health — evidence mapping and perspectives from Portugal. *Foods*, 15(5), Article 908. https://doi.org/10.3390/foods15050908
4. Sukmana, H., Rizwana, I., Dobozi, R., Al-Tayawi, A. N., Szabó, B. P., Özer, B. et al. (2025). A review of various protein separation techniques and valorization of cheese whey and buttermilk. *European Food Research and Technology*, 251(12), 4263–4279. https://doi.org/10.1007/s00217-025-04877-w
5. Костенко, К. В., Костенко, Е. Г., Пойдун, Ф. А., Рехман, З. А., Аскерова, А. С., Голик, Д. Б. и др. (2026). Оптимизация процесса восстановления вторичных молочных продуктов с применением ультразвуковой обработки и исследование их стабильности. *Аграрный вестник Урала*, 26(1), 140–151. [Kostenko, K. V., Kostenko, E. G., Poydun, F. A., Rekhman, Z. A., Askerova, A. S., Golik, D. B. et al. (2026). Optimization of the regeneration process for secondary dairy products using ultrasonic treatment and a study of their stability. *Agrarian Bulletin of the Urals*, 26(1), 140–151. (In Russian)] https://doi.org/10.32417/1997-4868-2026-26-01-140-151
6. Свириденко, Ю. Я., Кравченко, Е. Ф., Яковлева, О. А. (2008). Использование молочной сыворотки и локальная очистка сточных вод. *Молочная промышленность*, 11, 58–60. [Sviredenko, Yu. Ya., Kravchenko, E. F., Yakovleva, O. A. (2008). Milk whey application and local purification of effluents. *Dairy Industry*, 11, 58–60. (In Russian)]
7. Semproli, R., Cassano, L., Ballabio, G., Cappelletti, G., Speranza, G., Donzella, S. et al. (2025). Upcycling cheese whey permeate into fully bio-based surfactants through fermentation and biocatalysis. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 109(1), Article 270. https://doi.org/10.1007/s00253-025-13630-y
8. Usmani, Z., Sharma, M., Gaffey, J., Sharma, M., Dewhurst, R. J., Moreau, B. et al. (2022). Valorization of dairy waste and by-products through microbial bioprocesses. *Bioresource Technology*, 346, Article 126444. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126444
9. Mirzakulova, A., Sarsembaeva, T., Suleimenova, Z., Kowalski, Ł., Gajdzik, B., Wolniak, R. et al. (2025). Whey: Composition, processing, application, and prospects in functional and nutritional beverages — A review. *Foods*, 14(18), Article 3245. https://doi.org/10.3390/foods14183245
10. Tsermoula, P., Khakimov, B., Nielsen, J. H., Engelsen, S. B. (2021). WHEY-The wastestream that became more valuable than the food product. *Trends in Food Science and Technology*, 118(Part A), 230–241. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.08.025
11. Juthi, L. M., Kabir, T., Podder, N., Bhuiyan, M. H. R., Yeasmen, N., Aziz, M. G. (2025). Separation and characterization of whey protein powder from cheese by-product. *Applied Food Research*, 5(2), Article 101398. https://doi.org/10.1016/j.afres.2025.101398
12. Kumar, L. R. G., Mohanan, V., Pavithra, P. A., Anas, K. K. (2026). Encapsulation of squalene in oil-in-water emulsions: Utilization of heat-polymerized whey proteins as emulsifiers. *International Journal of Biological Macromolecules*, 352 Article 151090. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2026.151090
13. Chawla, R., Roy, S., Malik, B. (2023). Valorisation of Whey for Development of Different Types of Food Products Including Fermented Beverages. Chapter in a book: Whey Valorization. Springer, Singapore, 2023. https://doi.org/10.1007/978-981-99-5459-9_11
14. Chen, G. Q., Qu, Y., Gras, S. L., Kentish, S. E. (2023). Separation technologies for whey protein fractionation. *Food Engineering Reviews*, 15(3), 438–465. https://doi.org/10.1007/s12393-022-09330-2
15. Prabhakaran, G. S., Molitor, M., Govindasamy-Lucey, S., Lucey, J. A. (2024). Heat-stable whey protein isolate made using isoelectric precipitation and clarification. *Journal of Dairy Science*, 107(9), 6629–6642. https://doi.org/10.3168/jds.2024-24671
16. Lamkaddam, I. U., Vega, E., Colón, J., Ponsá, S., Llenas, L., Mora, M. (2023). Progressive freeze concentration of cheese whey for protein and lactose recovery. *International Dairy Journal*, 139, Article 105572. https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2022.105572
17. Al Kader, H., Gill, H., Truong, T. (2023). Demineralisation and recovery of whey proteins from commercial full-fat salty Cheddar whey using size-exclusion chromatography. *Food Chemistry*, 405(1–3), Article 134831. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.134831
18. Pellegrino, L., Hogenboom, J. A., Rosi, V., Sindaco, M., Gerna, S., D'Incecco, P. (2022). Focus on the protein fraction of sports nutrition supplements. *Molecules*, 27(11), Article 3487. https://doi.org/10.3390/molecules27113487
19. Patel, S. (2015). Functional food relevance of whey protein: A review of recent findings and scopes ahead. *Journal of Functional Foods*, 19(10), 308–319. https://doi.org/10.1016/j.jff.2015.09.040
20. Cereda, E., Pisati, R., Rondanelli, M., Caccialanza, R. (2022). Whey protein, leucine- and vitamin-D-enriched oral nutritional supplementation for the treatment of sarcopenia. *Nutrients*, 14(7), Article 1524. https://doi.org/10.3390/nu14071524
21. Ryan, M. P., Walsh, G. (2016). The biotechnological potential of whey. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 15(3), 479–498. https://doi.org/10.1007/s11157-016-9402-1

22. Uribarrena, M., Rovira-Cal, E., Urbina, L., Suárez, M. J., Aymerich, E., Guerrero, P. et al. (2024). Valorization of cheese whey: Closing the loop from protein extraction to whey protein film composting. *Green Chemistry*, 26(7), 4103–4111. https://doi.org/10.1039/D3GC04304E
23. Гаврилов, Г. Б., Гаврилов, Б. Г. (2009). Закономерности мембранного концентрирования сывороточных белков. *Техника и технология пищевых производств*, 1(12), 26–29. [Gavrilov, G. B., Gavrilov, B. G. (2009). Laws membran concentration whey fibers. *Food Processing: Techniques and Technology*, 1(12), 26–29. (In Russian)]
24. Храмцов, А. Г. (2021). Технологический прорыв агропищевых инноваций молочного дела на примере универсального сельхозсырья. Обратный осмос. *Аграрно-пищевые инновации*, 2(14), 7–20. [Khramtsov, A. G. (2021). Technological breakthrough of agrarian-and-food innovations in dairy case for example of universal agricultural raw materials. Reverse osmosis. *Agrarian-and-Food Innovations*, 2(14), 7–20. (In Russian)] https://doi.org/10.31208/2618-7353-2021-14-7-20
25. Abish, Z. A., Alibekov, R. S., Tarapoulouzi, M., Bakhtybekova, A. R., Kobzhasarova, Z. I. (2024). Review in deep processing of whey. *Cogent Food and Agriculture*, 10(1), Article 2415380. https://doi.org/10.1080/23311932.2024.2415380
26. Paladii, I. V., Vrabie, E. G., Sprinchan, K. G., Bologa, M. K. (2021). Whey: Review. Part 2. Treatment processes and methods. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 57, 651–666. https://doi.org/10.3103/S1068375521060119
27. Pires, A. F., Marnotes, N. G., Rubio, O. D., Garcia, A. C., Pereira, C. D. (2021). Dairy by-products: A review on the valorization of whey and second cheese whey. *Foods*, 10(5), Article 1067. https://doi.org/10.3390/foods10051067
28. Khalid, M., Ghasem, N., Yang, X., Schroen, K., Nazir, A. (2025). Progress in membrane technology for the enrichment of individual whey proteins. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 64(40), 19305–19321. https://doi.org/10.1021/acs.iecr.5c00643
29. Барковская, И. А., Кручинин, А. Г. (2024). Исследование процесса селективной термоденатурации белков молочной сыворотки. *Пищевая промышленность*, 11, 34–37. [Barkovskaya, I. A., Kruchinin, A. G. (2024). Study of the process of selective thermodenaturation of whey proteins. *Food Industry*, 11, 34–37. (In Russian)] https://doi.org/10.52653/PPI.2024.11.11.006
30. Casas, V. E. G., Pérez, J. V., Companioni, R. S., García, N. D. (2021). Protein recovery from residual bovine whey: Influence of acid thermo-coagulation. *Revista Bionatura*, 6(1), 1602–1607. https://doi.org/10.21931/RB/2021.06.01.24
31. Храмцов, А. Г. (2014). Логистика формирования технологической платформы получения биокластеров жира и белков из молочной сыворотки. *Техника и технология пищевых производств*, 2(33), 102–107. [Hramtsov, A. G. (2014). Formation logistics of technological platform for obtaining lipid and protein bio-clusters from whey. *Food Processing: Techniques and Technology,* 2(33), 102–107. (In Russian)]
32. Toro-Sierra, J., Tolkach, A., Kulozik, U. (2013). Fractionation of α-lactalbumin and β-lactoglobulin from whey protein isolate using selective thermal aggregation, an optimized membrane separation procedure and resolubilization techniques at pilot plant scale. *Food and Bioprocess Technology*, 6(4), 1032–1043. https://doi.org/10.1007/s11947-011-0732-2
33. Aider, M., De Halleux, D., Akbache, A. (2007). Whey cryoconcentration and impact on its composition. *Journal of Food Engineering*, 82(1), 92–102. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2007.01.024
34. Hanušová, J., Mihulova, M., Diblikova, L., Čurda, L. (2014). Influence of salts on selective coagulation of whey proteins and their application in the isolation of β-lactoglobulin. *Czech Journal of Food Sciences*, 32(1), 77–81. https://doi.org/10.17221/524/2012-CJFS
35. He, L., Ma, J., Lu, H., Li, Q., Liang, T., Shang, J. (2026). Recovery of active proteins from whey via a novel hybrid process of chitosan extraction and electrodialysis with ultrafiltration membrane. *Chemical Engineering Science*, 330, Article 123849. https://doi.org/10.1016/j.ces.2026.123849
36. Nath, A., Zin, M. M., Molnár, M. A., Bánvölgyi, S., Gáspár, I., Vatai, G. et al. (2022). Membrane chromatography and fractionation of proteins from whey — A review. *Processes*, 10(5), Article 1025. https://doi.org/10.3390/pr10051025
37. Romo, M., Bou, R., Castellari, M., Felipe, X. (2026). Caprine and bovine cheese whey valorization: High-pressure processing for α-lactalbumin fractionation from whey concentrates. *International Dairy Journal*, 175, Article 106553. https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2026.106553
38. Rama, G. R., Timmers, L. F. S. M., de Souza, C. F. V. (2021). Ultrafiltration of cheese whey: Achieving high protein rejection and sustaining membrane efficiency. *Journal of Food Processing and Preservation*, 45(11), Article e15908. https://doi.org/10.1111/jfpp.15908
39. Wang, W. Q., Han, X., Yi, H., Zhang, L. W. (2018). The ultrafiltration efficiency and mechanism of transglutaminase enzymatic membrane reactor (EMR) for protein recovery from cheese whey. *International Dairy Journal*, 80, 52–61. https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2017.12.012
40. Casal, E., Montilla, A., Moreno, F. J., Olano, A., Corzo, N. (2006). Use of chitosan for selective removal of β-lactoglobulin from whey. *Journal of Dairy Science*, 89(5), 1384–1389. https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(06)72206-8
41. Cheng, Z., van Leusden, P., Eisner, M. D., Ahrné, L. (2026). Effect of the protein content and amount of native whey protein on properties of heat and acid-induced milk gels. *International Dairy Journal*, 179, Article 106643. https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2026.106643
42. Anema, S. G. (2021). Heat-induced changes in caseins and casein micelles, including interactions with denatured whey proteins. *International Dairy Journal*, 122, Article 105136. https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2021.105136
43. Kharlamova, A., Nicolai, T., Chassenieux, C. (2019). Heat-induced gelation of mixtures of casein micelles with whey protein aggregates. *Food Hydrocolloids*, 92(4), 198–207. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.01.048
44. El-Tanboly, E. S., El-Hofi, M. K., Khorshid. (2017). Recovery of cheese whey, a by-product from the dairy industry for use as an animal feed. *Journal of Nutrition and Health Food Engineering*, 6(5), 148–153. https://doi.org/10.15406/jnhfe.2017.06.00215
45. Sebastián-Nicolás, J. L., González-Olivares, L. G., Vázquez-Rodríguez, G. A., Lucho-Constatino, C. A., Castañeda-Ovando, A., Cruz-Guerrero, A. E. (2020). Valorization of whey using a biorefinery. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 14(5), 1010–1027. https://doi.org/10.1002/bbb.2100
46. Souza, H. K. S., Gonçalves, M. D. P., Gómez, J. (2011). Effect of Chitosan Degradation on its Interaction with β-Lactoglobulin. *Biomacromolecules*, 12(4), 1015–1023, https://doi.org/10.1021/bm101356g
47. Jarto, I., Lucey, J. A., Molitor, M. S., Smith, K. E. (2015). Utilisation of chitosan flocculation of residual lipids and microfiltration for the production of low fat, clear WPC 80. *International Journal of Dairy Technology*, 68(4), 471–477. https://doi.org/10.1111/1471-0307.12249
48. Cochachín-Guerra, B., Moreno-Cuevas, J., Carvajal-Mena, N. (2023). Effects of concentration by block freezing and vacuum evaporation on the physicochemical properties and digestibility of whey. *CyTA-Journal of Food*, 21(1), 313–320. https://doi.org/10.1080/19476337.2023.2196321
49. Dobozi, R., Jákói, Z. P., Beszédes, S., Szabó, B. P., Kertész, S. (2026). Investigating the separation efficiency of ultrafiltration/diafiltration (UF/DF) of whey by dielectric measurements. *Sustainable Chemistry*, 7(1), Article 1. https://doi.org/10.3390/suschem7010001

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ	AUTHOR INFORMATION
Принадлежность к организации	**Affiliation**
Мамыкин Денис Станиславович — кандидат технических наук, научный сотрудник, отдел микробиологических исследований, Всероссийский научно-исследовательский институт маслоделия и сыроделия 152613, Ярославская область, Углич, Красноармейский бульвар, 19 E-mail: d.mamykin@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2145-1439 * автор для контактов	**Denis S. Mamykin**, Candidate of Technical Sciences, Researcher, Department of Microbiological Research, All-Russian Scientific Research Institute of Butter- and Cheesemaking 19, Krasnoarmeysky Boulevard, Uglich, 152613, Yaroslavl Region, Russia E-mail: d.mamykin@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2145-1439 * corresponding author
Шухалова Ольга Михайловна — кандидат технических наук, руководитель, отдел микробиологических исследований, Всероссийский научно-исследовательский институт маслоделия и сыроделия 152613, Ярославская область, Углич, Красноармейский бульвар, 19 E-mail: o.shukhalova@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7665-8517	**Olga M. Shukhalova**, Candidate of Technical Sciences, Supervisor, Department of Microbiological Research, All-Russian Scientific Research Institute of Butter- and Cheesemaking 19, Krasnoarmeysky Boulevard, Uglich, 152613, Yaroslavl Region, Russia E-mail: o.shukhalova@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7665-8517
Волкова Татьяна Алексеевна — кандидат технических наук, ученый секретарь, Всероссийский научно-исследовательский институт маслоделия и сыроделия 152613, Ярославская область, Углич, Красноармейский бульвар, 19 E-mail: t.volkova@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1863-009X	**Tatiana A. Volkova**, Candidate of Technical Sciences, scientific secretary, All-Russian Scientific Research Institute of Butter- and Cheesemaking 19, Krasnoarmeysky Boulevard, Uglich, 152613, Yaroslavl Region, Russia E-mail: t.volkova@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1863-009X
Бородина Ульяна Владимировна — инженер I категории, отдел микробиологических исследований, Всероссийский научно-исследовательский институт маслоделия и сыроделия 152613, Ярославская область, Углич, Красноармейский бульвар, 19 E-mail: u.borodina@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0009-0001-7948-8840	**Ulyana V. Borodina**, 1st Category Engineer, Department of Microbiological Research, All-Russian Scientific Research Institute of Butter- and Cheesemaking 19, Krasnoarmeysky Boulevard, Uglich, 152613, Yaroslavl Region, Russia E-mail: u.borodina@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0009-0001-7948-8840

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ	AUTHOR INFORMATION
Принадлежность к организации	**Affiliation**
Григорьева Анастасия Игоревна — младший научный сотрудник, отдел физико-химических и биохимических исследований, Всероссийский научно-исследовательский институт маслоделия и сыроделия 152613, Ярославская область, Углич, Красноармейский бульвар, 19 E-mail: a.grigoriyeva@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4364-0342	**Anastasia I. Grigorieva**, Junior Researcher, Department of Physical, Chemical and Biochemical Research, All-Russian Scientific Research Institute of Butter- and Cheesemaking 19, Krasnoarmeysky Boulevard, Uglich, 152613, Yaroslavl Region, Russia E-mail: a.grigoriyeva@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4364-0342
Критерии авторства	**Contribution**
Концептуализация — **Мамыкин Д. С.** и **Шухалова О. М.**; методология — **Мамыкин Д. С.**, **Шухалова О. М.**, **Волкова Т. А.**; исследование — **Бородина У. В.** и **Григорьева А. И.**; обработка и анализ данных — **Мамыкин Д. С.**, **Шухалова О. М.**, **Волкова Т. А.**; написание статьи и редактирование — **Мамыкин Д. С.**, **Шухалова О. М.**, **Волкова Т. А.**, **Бородина У. В.** Авторы в равных долях имеют отношение к написанию рукописи и одинаково несут ответственность за плагиат.	Conceptualization — **Denis S. Mamykin**, **Olga M. Shukhalova**; methodology — **Denis S. Mamykin**, **Olga M. Shukhalova**, **Tatiana A. Volkova**; investigation — **Ulyana V. Borodina**, **Anastasia I. Grigorieva**; data curation and analysis — **Denis S. Mamykin**, **Olga M. Shukhalova**, **Tatiana A. Volkova**; writing-article and editing — **Denis S. Mamykin**, **Olga M. Shukhalova**, **Tatiana A. Volkova**, **Ulyana V. Borodina.** Authors equally relevant to the writing of the manuscript, and equally responsible for plagiarism.
Конфликт интересов	**Conflict of interest**
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.	The authors declare that there is no conflict of interest.

DOI: https://doi.org/10.21323/2618-9771-2026-9-2-316-328

Поступила 15.02.2026
Поступила после рецензирования 14.06.2026
Принята в печать 17.06.2026
© Пухальский Я. В., Лоскутов С. И., Воробьев Н. И., Питти Х. К., Глушаков Р. И., Ситнов В. Ю., 2026

https://www.fsjour.com/jour
Научная статья
Открытый доступ

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ЭКСТРАКТА ЗООГУМУСА НА БИОХИМИЮ И ВЕГЕТАТИВНЫЙ РОСТ СТЕВИИ МЕДОВОЙ (*STEVIA REBAUDIANA*)

Пухальский Я. В.[1], Лоскутов С. И.[1], Воробьев Н. И.[2], Питти Х. К.[3], Глушаков Р. И.[4,5], Ситнов В. Ю.[1]

[1] Всероссийский научно-исследовательский институт пищевых добавок, Санкт-Петербург, Россия
[2] Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной микробиологии, Санкт-Петербург, Россия
[3] Институт сельскохозяйственных инноваций Панамы, Клейтон, Панама
[4] Военно-медицинская академия имени С. М. Кирова, Санкт-Петербург, Россия
[5] Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет, Санкт-Петербург, Россия

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:
Stevia rebaudiana, зоогумус, Hermetia illucens, аминокислоты, жирные кислоты, элементный профиль, хлорофилл, нейросеть

АННОТАЦИЯ

Одним из положений доктрины продовольственной безопасности России регламентируется создание устойчивых и эффективных технологий экологического выращивания растений, продуцирующих сладкие вещества как природные сахарозаменители. Во многом это обусловлено высокой распространенностью болезней, ассоциированных с избыточным потреблением рафинированных углеводов. В связи с этим требуется системная модификация образа жизни и рациона питания людей из группы высокого риска. Среди растений-сахарозаменителей выделяют стевию медовую (*Stevia rebaudiana Bertoni*). В настоящее время созданы районированные сорта, предназначенные для возделывания стевии в отдельных климатических регионах России. Однако при выращивании культуры в открытом грунте аграрии зачастую сталкиваются с проблемой слабой всхожести исходного семенного материала, которая для большинства культивируемых генотипов не превышает 15–25 %. Перспективной альтернативой данному подходу является выращивание стевии на искусственных нейтральных субстратах, в закрытом грунте с использованием метода интенсивной светокультуры, при минимизации или полном отказе от внесения минеральных удобрений. На сегодняшний день практически отсутствуют технологические решения, адаптированные для органического выращивания данной культуры с целью максимизации скорости ее роста и оптимизации конечных морфологических и биохимических показателей. Поэтому целью данного исследования являлось проведение сравнительной оценки влияния разных удобрительных методик на урожайность и обмен веществ в зеленой биомассе листьев растений. В качестве органического варианта предложен способ выращивания растений в защищенном грунте с применением нового типа органического удобрения в виде жидких экстрактов, полученных из зоогумуса насекомого черной львинки (*Hermetia illucens*). Срок вегетации составил 60 суток. Экспериментальный дизайн был рандомизирован десятью повторностями на каждый вариант. Полученные при сборе и анализе зеленой биомассы экспериментальные данные, помимо традиционных методов статистической обработки, были проанализированы с помощью специализированной прогностической нейросети, разработанной авторами. Нейросеть позволяет рассчитывать индексы когнитивной значимости урожая (Cognitive Salience Index), которые используются для количественной оценки интенсивности массонакопительных и биохимических процессов в растениях при определении оптимального режима их питания. Расчеты производились на основе сопоставления изменений содержания компонентов в конечном профиле аминокислот, жирных кислот и пуле эссенциальных элементов, с вариабельностью накопления общего хлорофилла и биометрическими характеристиками побегов. В удобрительную схему опыта также был заложен вариант чистого контроля, предусматривающий выращивание растений на фильтрованной воде. По итогу по всем полученным показателям здесь были зафиксированы минимальные значения в росте и развитии. Разница в наборе веса, высоты, метаболизме и аккумуляции биогенных веществ между вариантами растений, выращенных на минеральной и органической основе, была несущественна, что доказывает перспективу использования последних в качестве экологической альтернативы. При этом, уровень консолидации питательных веществ в биомассе растений, выращенных с применением зоогумуса *H. Illucens,* превышал аналогичный показатель для минерального удобрения по индексу CSIfract.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема FGUS 2024-0010).

Received 15.02.2026
Accepted in revised 14.06.2026
Accepted for publication 17.06.2026
© Puhalsky J. V., Loskutov S. I., Vorobyov N. I., Pitti J. C., Glushakov R. I., Sitnov V. Yu., 2026

Available online at https://www.fsjour.com/jour
Original scientific article
Open access

EVALUATION OF THE INFLUENCE OF ZOOHUMUS EXTRACT ON BIOCHEMISTRY AND VEGETATIVE GROWTH OF *STEVIA REBAUDIANA*

Jan V. Puhalsky[1], Svyatoslav I. Loskutov[1], Nikolay I. Vorobyov[2], J. Caballero Pitti[3], Ruslan I. Glushakov[4,5], Veniamin Yu. Sitnov[1]

[1] All-Russian Research Institute of Food Additives, Saint Petersburg, Russia
[2] All-Russia Research Institute for Agricultural Microbiology, Saint Petersburg, Russia
[3] The Institute of Agricultural Innovation of Panama (IDIAP), Clayton, Panama
[4] S.M. Kirov Military Medical Academy, Saint Petersburg, Russia
[5] Saint Petersburg State Pediatric Medical University, Saint Petersburg, Russia

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: **Пухальский, Я. В., Лоскутов, С. И., Воробьев, Н. И., Питти Х. К., Глушаков, Р. И., Ситнов В. Ю.** (2026). Оценка влияния экстракта зоогумуса на биохимию и вегетативный рост стевии медовой (*Stevia rebaudiana*). *Пищевые системы*, 9(2), 316–328. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2026-9-2-316-328

FOR CITATION: **Puhalsky, J. V., Loskutov, S. I., Vorobyov, N. I., Pitty, J. C., Glushakov, R. I., Sitnov V. Yu.** (2026). Evaluation of the influence of zoohumus extract on biochemistry and vegetative growth of *Stevia rebaudiana*. *Food Systems,* 9(2), 316–328. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2026-9-2-316-328

KEYWORDS:
Stevia rebaudiana, zoohumus, Hermetia illucens, amino acids, fatty acids, elemental profile, chlorophyll, neural network

ABSTRACT
One of the provisions of Russia's food security doctrine regulates the development of sustainable and effective technologies for the organic cultivation of plants that produce sweet substances as natural sugar substitutes. This is largely due to the high prevalence of diseases associated with excessive consumption of refined carbohydrates. Therefore, systematic modification of the lifestyle and diet of high-risk individuals is required. *Stevia rebaudiana* Bertoni stands out among the plants used as sugar substitutes. Currently, zoned varieties have been developed for cultivation in specific climatic regions of Russia. However, when growing the crop outdoors, farmers often face the problem of poor germination of the original seed material, which for most cultivated genotypes does not exceed 15–25%. A promising alternative to this approach is growing stevia on artificial neutral substrates, indoors using intensive photoculture, with minimal or no application of mineral fertilizers. Currently, there are virtually no technological solutions adapted for organic cultivation of this crop that maximize its growth rate and optimize its final morphological and biochemical parameters. Therefore, the aim of this study was to conduct a comparative assessment of the impact of different fertilization methods on yield and metabolism in the green biomass of plant leaves. As an organic option, a method of growing plants in protected soil using a new type of organic fertilizer in the form of liquid extracts obtained from the zoohumus of the black soldier fly (*Hermetia illucens*) was proposed. The vegetation period was 60 days. The experimental design was randomized, with ten replicates for each treatment. The experimental data obtained from collecting and analyzing the green biomass, in addition to traditional statistical processing methods, were analyzed using a specialized predictive neural network developed by the authors. The neural network allows for the calculation of cognitive salience indices (Cognitive Salience Index), which are used to quantitatively assess the intensity of mass accumulation and biochemical processes in plants when determining their optimal nutritional regimen. Calculations were based on a comparison of changes in the component content of the final amino acid, fatty acid, and essential element profiles, with variability in total chlorophyll accumulation and shoot biometric characteristics. The fertilization regimen also included a pure control variant, involving plant cultivation in filtered water. As a result, for all the indicators obtained, minimal values in growth and development were recorded here. Differences in weight gain, height, metabolism, and nutrient accumulation between the mineral- and organic-grown plants were insignificant, demonstrating the potential for using the latter as an environmentally friendly alternative. Furthermore, the level of nutrient consolidation in the biomass of plants grown using *H. illucens* zoohumus exceeded that of the mineral fertilizer, according to the CSIfract index.

FUNDING: The work was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (FGUS 2024-0010).

1. Введение

Стевия или двулистник сладкий (*Stevia rebaudiana Bertoni*) — это многолетний, вечнозеленый, тепло- и светолюбивый полукустарник, произрастающий в субтропической зоне. В природе растение является эндемиком, достигающим высоты 100–120 см [1]. Ареал растения охватывает верхнее течение реки Параны в регионе Амамбай (Парагвай). Также оно встречается в близлежащих к Парагваю регионах Бразилии и Аргентины. Стевия относится к семейству астровые (*Asteraceae*). Ее первоначальное название было *Eupatorium rebaudianum*, но в 1905 году она была переименована [2].

За последние годы интерес к стевии со стороны научного сообщества заметно возрос. Связано это прежде всего с тем, что в ее листьях содержатся сладкие диетические дитерпеновые гликозиды (Е960), близкие по вкусовым качествам к сахарозе и превосходящие ее по сладости в 300 и более раз [1,3–5]. Всего в *S. rebaudiana* их обнаружено более 60, но экономически значимыми являются лишь несколько (стевиол, стевиозид, ребаудиозиды А и В и др.). Эти соединения термостабильны и хорошо переносят низкие значения кислотности среды [2,6]. Их содержание в сухом веществе листьев в среднем варьирует от 4 до 17% [7,8], и в первую очередь зависит от сортовых особенностей растений и агротехнических приемов возделывания. Сухие листья стевии слаще сахарозы примерно в 10–15 раз, а их гликемический индекс равен нулю [9]. Благодаря природному происхождению и низкой калорийности это растение рассматривается как перспективная альтернатива тростниковому и свекловичному сахару [10,11], а также искусственным подсластителям, таким как аспартам и сахарин [12]. Один грамм листьев стевии эквивалентен 25 г сахара [13]. Особое значение это имеет для людей с избыточной массой тела и сахарным диабетом II типа [14]: даже современные лекарственные препараты не способны полностью компенсировать влияние несбалансированного питания на уровень глюкозы крови и набор массы тела [15,16], а также на развитие ассоциированных заболеваний [17]. Проведенные клинические исследования продемонстрировали, что употребление стевии значительно снижало постпрандиальный уровень содержания глюкозы и инсулина в крови после приема пищи, богатой сахарозой и аспартамом [18]. У респондентов клинической группы, потреблявших стевию, чувство сытости возникало значительно быстрее. Стевия признана безопасным ингредиентом в детском питании и в период беременности.

Стевиолгликозиды не вызывают побочных эффектов при употреблении в умеренных количествах [19,20]. На 69-м заседании Объединенного экспертного комитета FAO/WHO по пищевым добавкам (JECFA), проведенном в 2009 году, была установлена их допустимая суточная доза (в пересчете на стевиол) в 0–4 мг/кг массы тела, а стевии был присвоен статус NOAEL (уровень, не вызывающий наблюдаемых побочных эффектов) [21]. В 2010 году Европейское агентство по безопасности пищевых продуктов (EFSA) также провело оценку безопасности стевиолгликозидов и опубликовало экспертное заключение, подтверждающее безопасность их применения в пищевой промышленности и бытовом использовании. На сегодняшний день ни одно исследование *in vitro* не выявило кластогенного, тератогенного или канцерогенного эффекта стевии при ее применении в качестве подсластителя в пределах допустимых доз [22–24]. Однако генотоксичные тесты *in vivo* и долгосрочные эффекты влияния стевиозида на хромосомы человека еще предстоит изучить.

27 февраля 2024 года вступили в силу изменения в ТР ТС 029/2012[1], согласно которым из перечня разрешенных пищевых добавок исключены 19 позиций, включая стевию в форме порошка листьев и сиропа на их основе. Таким образом, в регламенте сохранено разрешение на использование в пищевой промышленности только высокоочищенных стевиолгликозидов. Применение сухих листьев стевии не запрещено, однако не допускается их использование в качестве комплексной пищевой добавки.

Помимо пищевой ценности, экстракты из листьев обладают противовоспалительным [25,26], антиоксидантным [27–31], противовирусным [32] и ранозаживляющим действием [33–36]. В литературе отмечено антимикробное действие водно-спиртовых экстрактов в отношении таких патогенных организмов, как *Enterococcus faecium*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Bacillus cereus* и *Klebsiella pneumoniae* [37–40]. Многие медицинские применения лекарственного сырья, полученного из листьев *S. rebaudiana*, показаны на Рисунке 1 [41].

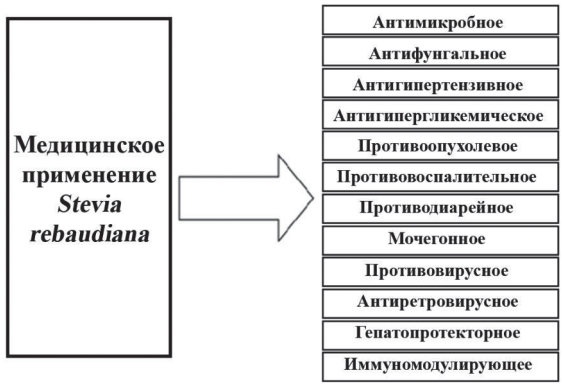


Рисунок 1. **Лекарственное применение листьев стевии [41]**
Figure 1. **Medicinal use of *Stevia rebaudiana* leaves [41]**

[1] Технический регламент Таможенного Союза ТР ТС 029/2012 «Требования безопасности пищевых добавок, ароматизаторов и технологических вспомогательных средств». Принят Решением Коллегии Евразийской экон. комиссии от 20 июля 2012 г. № 58. (ред. от 29 августа 2023 года). Электронный ресурс https://docs.cntd.ru/document/902359401. Дата доступа 25.01.2026

Листья стевии также обладают нематоцидной активностью против наиболее известного представителя *Meloidogyne incognita* [42]. Благодаря особенностям биосинтеза стевиола в стевии, все его производные имеют сходство химической структуры с фитогормонами гиббереллинами [43]. На примере пшеницы показана рост-стимулирующая и адаптогенная активность стевиозида для повышения устойчивости растений к низким температурам [44]. Некорневая обработка экстрактом из листьев стевии также достоверно повышала урожайность зеленых овощей, выращенных в интенсивной светокультуре защищенного грунта [45]. Кроме того, листья растения содержат большое количество энергии, которая в перспективе может быть использована при производстве электроэнергии [46–48].

Во всем мире сейчас отведено около 32 000 га пашни под возделывание стевии. Основными коммерческими производителями стевии и продуктов ее переработки прежде всего являются страны Юго-Восточной Азии, Китай и Япония, где до 50 % сахара заменено на стевию [49,50]. В 2018 году, по данным Китайской торговой палаты по импорту и экспорту лекарственных средств и товаров для здоровья, экспорт гликозидов стевиолы составил 5700 тонн (0,26 миллиарда долларов). Япония при этом была первой страной, в которой выращивание и переработку стевии поставили на промышленный уровень. Растение также успешно выращивается как однолетник в Европе, США и Канаде [1,51]. Для России культура является относительно новой. Изначально в страну ее привез Н. И. Вавилов в 30-е годы из своих экспедиций по Латинской Америке. Однако семена не проросли, всхожесть оказалась нулевой. Активное же изучение культуры началось с 80-х годов XX века в связи с поиском природных сахарозаменителей в СССР. Работы по акклиматизации стевии возглавил ВНИИ сахарной свеклы в Киеве. Также работы проводились в Никитском ботаническом саду в Крыму. После распада СССР выращивание стевии в южных регионах России было продолжено во Всероссийском НИИ сахара и свеклы им. А. Л. Мазлумова. В 1995 году стевия как новая техническая культура была впервые включена в Государственный реестр селекционных достижений РФ. Сейчас предпринимаются попытки интродукции культуры в среднюю полосу страны. Однако из-за проблемы слабой устойчивости стевии к продолжительным заморозкам выращивание ее в областях Нечерноземья пока затруднено [49]. Решением данной проблемы может служить мировая практика расширения площадей выращивания растений за счет их индустриального возделывания в сооружениях защищенного грунта. При этом применяется технология беспочвенного культивирования растений на искусственных питательных средах, объединяемая под общим названием гидропоника. Среди ее разновидностей выделяют хемопонику и агрегатопонику, основанные на использовании инертных или слабо доступных для питания растений субстратов (верховой торф, кокосовое волокно, вермикулит, керамзит и перлит). Отказ от почвы позволяет осуществлять круглогодичный цикл выращивания растений. В условиях непрерывного возделывания культур в полевых условиях это, напротив, приводило бы к деградации (утомлению) почв, изменению их физико-химических свойств и состава микробных сообществ, определяющих состояние экосистем. Кроме того, повышался бы риск заражения биомассы патогенными микроорганизмами и микотоксинами. Кроме того, повышался бы риск заражения биомассы патогенными микроорганизмами и микотоксинами.

Управление режимом питания растений — важная агрономическая практика, которая может повлиять на качество формируемого урожая [52–54]. Так, для уменьшения количества использования синтетических удобрений и снижения себестоимости конечного продукта в качестве экологической альтернативы все чаще рекомендуют использовать органические добавки. Применение различных концентраций минеральных удобрений в первую очередь положительно влияет на морфологию и содержание вторичных метаболитов в листьях растений, но не стевиозидов. С последними ситуация обстоит сложнее: при оптимально подобранной дозе внесения минеральных удобрений абсолютная доля выхода стевиозидов на одно растение остается относительно стабильной, однако в пересчете на грамм сухого вещества их концентрации снижаются. Это свидетельствует о том, что эффективность выращивания стевии для получения стевиозидов может быть повышена при минимальном использовании минеральных удобрений за счет применения органических удобрений. Постепенное высвобождение доступных корням биогенных элементов из органических удобрений на ранних (виргинальных) этапах роста ювенильных растений может приводить к пищевому стрессу. Вероятно, это вызывает конкуренцию за поступление элементов питания в растение и приводит к увеличению образования стевиозида. У более зрелых (имматурных) культиваров наблюдается адаптация к минеральному фону питания, при которой эффективность использования элементов питания сохраняется или превышает контрольные значения. Потери биомассы при этом не наблюдается.

Считается, что большинство органических удобрений, применяемых в сельском хозяйстве при размножении культур, подходят и для промышленного выращивания стевии на полях [55]. По этому вопросу опубликовано множество исследований, связанных с повышением урожайности, усвоения питательных веществ и продуктивности стевии, в различных почвенно-климатических регионах мира. Преимущественно все они описывают использование традиционных гуматосодержащих удобрений в виде экстрактов, полученных из вермикомпоста, птичьего помета, навоза КРС или овец. Гумусовые кислоты, входящие в их состав, благодаря пролонгированному эффекту своего воздействия на агроэкосистемы способны оказывать как прямое, так и косвенное воздействие на физиологические и биохимические процессы, происходящие в растениях; в частности, увеличивать коэффициенты использования минеральных соединений в почвах, образуя с ними хелатные формы и повышая их доступность для растений. Как и в случае с почвенным органоминеральным земледелием открытого грунта, данные жидкие добавки могут использоваться и в гидропонике в качестве дополнительных биогенных элиситоров и иммуномодуляторов [56]. Помимо традиционного органического сырья выделяют новый вид жидкого органического удобрения в виде суспензии, полученной из зоогумуса [57] — сыпучего порошка, являющегося высушенным продуктом жизнедеятельности (экскрементов) личинок черной львинки (*Hermetia illucens Linnaeus,* 1758). Получают его в процессе переработки насекомыми отходов 3–4 класса опасности. По содержанию биогенных элементов зоогумус не уступает сухому птичьему помету [58]. Его близкий аналог — биогумус дождевых червей или вермикомпост. Проведенные исследования показывают, что сухой зоогумус *H. illucens* соответствует стандартам качества, установленным ГОСТ 33830-2016[2] и 53117–2008[3] для органических удобрений на основе отходов животноводства [59]. Он также является почвенным кондиционером, улучшающим влагоудерживающую способность почв. Таким образом, благодаря высокой биологической и питательной ценности его можно рекомендовать как дешевую альтернативу минеральным соединениям.

Русскоязычных работ, посвященных изучению показателей роста, развития и метаболизма стевии, а также других технических и пищевых растений, выращиваемых в условиях защищенного грунта, пока недостаточно. Это касается, в частности, исследований различных удобрительных технологий, включая применение жидких добавок на основе зоогумуса. Для большинства маржинальных овощных культур использование зоогумуса описано преимущественно как компонент сухих почвогрунтов на основе торфа. В литературе он рассматривается главным образом при приготовлении субстратов, а не в виде жидких форм. Расширение знаний по вопросу его использования в гидропонике остается весьма актуальным.

Согласно фрактальной природе самоорганизации живой материи, любая растительная биосистема (растительный организм) характеризуется фиксированным соотношением размеров своих органов и фиксированным соотношением химических элементов в белках собственных клеточных структур, так как эти соотношения запрограммированы в растениях на генетическом уровне. Учитывая данные законы, авторами была создана в Excel-среде (язык VBA) нейронная сеть ChemN N.

Благодаря применению методов биотехнологии в ближайшие годы производство листьев стевии преодолеет проблему спроса и предложения. Промышленное выращивание стевии и получение из нее некалорийных натуральных подсластителей для частичной замены ими сахарозы позволит снизить число больных сахарным диабетом, уменьшить зависимость от импорта сахара-сырца, сократить площади под сахароносными культурами на юге страны.

Целью настоящей работы было проведение нейросетевого анализа морфометрических данных растений стевии, выращенных в условиях агрегатопоники с использованием органических и минеральных удобрений. Дополнительно оценивалась связь полученных морфометрических показателей с аминокислотным и жирнокислотным составом, а также пулом эссенциальных элементов зеленой биомассы.

[2] ГОСТ 33830-2016 «Удобрения органические на основе отходов животноводства. Технические условия» — Москва: Стандартинформ, 2020. — 12 с.

[3] ГОСТ 53117-2008 «Удобрения органические на основе отходов животноводства технические условия» — Москва: Стандартинформ, 2009. — 15 с.

2. Объекты и методы

Эксперимент проводили в закрытом гроубоксе размером 1,5 × 1,5 × 1,5 м в условиях полной светокультуры согласно методике вегетационного опыта. Семена стевии очень мелкие и быстро теряют свою всхожесть, хотя в естественных условиях она размножается именно семенами. Поэтому первоначальная рассада была получена из закупленных семян. При посеве для определения качества использовался метод отбора по парусности. Те семена, которые при сбрасывании с высоты 50 см начинали кружиться в воздухе, а не падать, отбраковывались. Отобранные семена были рассажены в пластиковую кассету на 60 ячеек, заполненную смесью торфа, агроперлита и кокосового волокна [60,61]. Через 10 суток появились первые проростки, листья которых имели яркий зеленый окрас и высоту 15 см. Всхожесть составила 50 %. Далее здоровая рассада была поделена на 3 равные части по 10 культиваров и пересажена в двухлитровые пластиковые сосуды с дренажными отверстиями (Рисунок 2). Пикировка производилась во второй половине дня, чтобы избежать стресса.

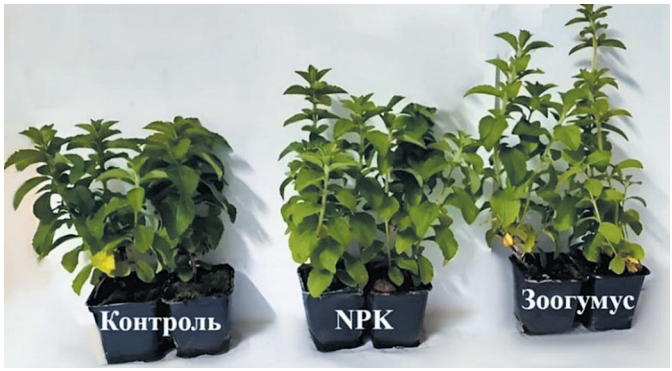


Рисунок 2. **Вид стевии в вегетационном опыте с разным удобрительным фоном**
Figure 2. **Appearance of stevia in the vegetation experiment with different fertilization backgrounds**

В условиях гидропоники стевия характеризуется лучшим ростом на субстратах с нейтральной или слабокислой средой [62]. При повышении pH до 8,0 у растений наблюдается хлороз. Поэтому при пикировке также был использован предварительно увлажненный кокосовый субстрат (pH = 5,5). Анализ субстрата не проводился. Примерные данные были взяты из другой работы [63] и приведены в Таблице 1.

Глубина посадки саженцев составила 10 см. Увлажнение субстрата проводилось путем его сквозного пролива разными питательными растворами, приготовленными на основе фильтрованной воды. Влажность субстрата на протяжении всего эксперимента поддерживали весовым способом, путем систематического прикорневого ручного полива сосудов.

Схема опыта была следующей: 1) контроль (фильтрованная вода): pH = 7,4, EC = 4,0 ppm; 2) комплексное минеральное удобрение (NPK): pH = 6,4, EC = 550–600 ppm; 3) 1,0 % щелочной раствор зоогумуса, полученный из сухого концентрата (ООО «Экобелок», Россия) с доведенным значениями pH до нейтральных показателей: pH = 7,3, EC = 650–700 ppm. На каждый вариант приходилось по 10 сосудов (повторности).

Суспензию зоогумуса перемешивали с принудительной аэрацией в течение 8 часов с помощью верхнеприводной мешалки MICROSTAR 7.5 control (IKA, Германия) для улучшения контакта частиц с жидкой средой и в дальнейшем настаивали в течение 16 часов при комнатной температуре. Выбор временного режима экстракции был обусловлен оптимальным извлечением биогенных элементов из исходного сырья [64] в суспензию, выходом гумусовых кислот, а также снижением риска развития анаэробных процессов с брожением и появлением неприятного запаха. Получившуюся суспензию отделяли от осадка путем фильтрации.

Выбор концентраций зоогумуса для разведения и внесения в субстрат был основан на наших ранних экспериментах, а также на рекомендациях других авторов [58,64,65]. Физико-химические показатели зоогумуса приведены в Таблице 2.

Удобрения вносились одноразово при посадке [66–69]. Концентрация 1,0 % (мас/об) зоогумуса соответствует 10000 мг/л суммарного сухого вещества. Значение EC = 650–700 ppm (среднее ≈ 675 мг/л) отражало лишь ионную (растворимую) фракцию препарата, тогда как остальные (~ 9325 мг/л) составляли коллоидные и взвешенные органические частицы. Таким образом, концентрация растворимых минеральных солей в 1 %-м зоогумусе составляла ~ 675 мг/л, а концентрация органического вещества — ~ 9325 мг/л. При разовом поливе (0,40–0,45 л/раст.) на каждое растение приходилось: минеральной (ионной) фракции — 270–304 мг/раст.; органического сухого вещества — 3730–4196 мг/раст.

Таблица 1. **Физико-химическая характеристика кокосового субстрата, используемого для выращивания стевии в контролируемой среде [63]**
Table 1. **Physico-chemical characteristics of the coconut substrate used for growing stevia in the controlled environment [63]**

Физико-химические параметры	Значение
Плотность, кг/м^3	115,0
Водоудерживающая способность, %	64,0
Процент аэрации, %	30,0
Электропроводность, мСм/см	< 0,8
pH_{KCl}	5,50
Степень минерализации волокна, ppm	400,0
NO_3, г/кг сухого вещества	2,65
NH_4, г/кг сухого вещества	1,72
P, г/кг сухого веществ	1,72
K, г/кг сухого вещества	80,40
Ca, г/кг сухого вещества	16,66
Mg, г/кг сухого вещества	5,73
S, г/кг сухого вещества	1,10
Na, г/кг сухого вещества	19,81
Cl, г/кг сухого вещества	77,50

Таблица 2. **Физико-химические показатели сухого порошка зоогумуса (Протокол испытаний ФГБНУ ФИЦ Почвенный институт им. В. В. Докучаева № 215 — П от 03 июня 2022 г)**
Table 2. **Physico-chemical indicators of the zoohumus dry powder (Test report of the FRC V. V. Dokuchaev Soil Science Institute No. 215 — П of June 03, 2022)**

Показатель	Значение
Обменный аммоний (массовая доля аммонийного азота), млн$^{-1}$	10,0
Фосфор (подвижная форма), мг/кг	820,0
Массовая доля органического вещества, %	62,8
pH водная вытяжка, ед	7,57
Калий (валовая форма), млн$^{-1}$	10500,0
Калий (подвижная форма), млн$^{-1}$	1989,3
Кальций (валовая форма), млн$^{-1}$	2550,0
Магний (валовая форма), млн$^{-1}$	2600,0
Натрий (валовая форма), млн$^{-1}$	37,0
Массовая доля марганца (валовая форма), млн$^{-1}$	218,9
Массовая доля меди (валовая форма), млн$^{-1}$	10,5
Массовая доля кадмия (валовая форма), млн$^{-1}$	< 0,1 (0,043)
Массовая доля цинка (валовая форма), млн$^{-1}$	179,2
Массовая доля железа (валовая форма), млн$^{-1}$	340,0
Массовая доля никеля (валовая форма), млн$^{-1}$	2,5
Массовая доля кобальта (валовая форма), млн$^{-1}$	0,9
Массовая доля алюминия (валовая форма), млн$^{-1}$	190,0
Массовая доля хрома (валовая форма), млн$^{-1}$	0,6
Массовая доля свинца (валовая форма), млн$^{-1}$	1,2

В качестве минерального удобрения использовали нитроаммофоску (16:16:16, мас.%) в концентрации 400 мг/л, при которой соотношение N: P_2O_5: K_2O достигает 64:64:64 мг/л. Суммарная концентрация растворимых солей при этом составляла ~ 575 мг/л (среднее EC ≈ 577 ppm, pH 6,4), что соответствует заявленному диапазону EC = 550–600 ppm. При однократном поливе до насыщения субстрата в двухлитровом сосуде (расчетный объем одного пролива ~ 0,40–0,45 л на сосуд с учетом дренажа) суммарное поступление действующих веществ на одно растение составляло: N — 25,6–28,8 мг/растение, P_2O_5 — 25,6–28,8 мг/раст., K_2O — 25,6–28,8 мг/раст. (итого ~ 77–87 мг NPK/растение); осмотическая нагрузка на корневую систему составила 230–259 мг растворимых солей/растение. Показано, что стевия отзывчива на внесение различных доз азота [70–75], фосфора [76–77]

и калия [78–80]. Значения их внесения варьируют в разных статьях. Для открытого грунта рекомендуют такие дозы: 300:180:160 кг/га NPK [81] и 300:100:240 кг/га [82]. Ключевую роль здесь играет внесение азота. Однако это актуально, если речь идет про многократный срез урожая. В нашем случае для тепличных условий рекомендуют брать норму азота 40 кг/га [83]. Исходя из анализа источников литературы, мы выбрали среднюю дозу для грунта $N_{64}P_{64}K_{64}$, как это было ранее установлено в Институте биоэнергетических культур и сахарной свеклы НААН [84].

Сопоставление осмотических нагрузок NPK (230–259 мг/раст.) и зоогумуса (270–304 мг/раст.) свидетельствует об их близкой ионной активности (разница ⩽17 %), что исключает осмотическую нагрузку как фактор, объясняющий различия в урожайности.

Оптимальными условиями для интенсивного роста стевии считается фотопериод менее 13 часов (в нашем случае 14 часов), температура воздуха 17–26 °C (в нашем случае 25 °C), влажность воздуха 60 % [85] и уровень освещенности 80–120 Вт/м^2 ФАР [86]. В опыте для освещения использовали светодиодную лампу производства LedForPlant на 400 Вт, дающую с 1,0 метра подвеса засветку на рабочую зону в 29 650 Лк, 94 Вт/м^2 или 444,7 мкмоль/м^2 с ФАР по формуле пересчета для белого света [87]. Срок вегетации после пикировки составил 60 суток. Данный период роста был выбран как средний исходя из другой работы по выращиванию стевии в тепличных условиях также на кокосовом субстрате с добавкой биогумуса [88].

По окончании опыта в зеленых листьях измеряли содержание общего хлорофилла с использованием портативного оптического датчика SPAD 502 Plus (Minolta Camera Co, Ltd, Япония), который по светоотражательным характеристикам растений вычисляет безразмерный NDVI. Показания данного прибора более точно отражают содержание фотосинтетических пигментов в листьях растений по сравнению с содержанием экстрагируемого хлорофилла, выраженным в пересчете на массу или площадь листа [89–92]. Он считается более удобным в использовании, чем его недорогой аналог atLEAF [93]. Показания снимались с трех верхних полностью развитых листьев каждого растения. Для каждого варианта обработки использовались 30 полностью развитых листьев. Измеритель SPAD сохранял и автоматически усреднял показания, чтобы получить одно значение для каждого растения. Затем растения извлекали из сосудов, измеряли длину и вес побегов.

Листья отделяли от побега и сушили в термостате при температуре 70–80 °C в течение 8 часов [94]. Высушенные листья измельчали до состояния порошка и определяли в нем содержание производных карбоновых кислот с помощью газовой хроматографии с масс-спектрометрией (ГХ–МС) на приборе Agilent 7890B (Agilent Technologies Canada, Inc.) [95–97], а также аккумуляцию эссенциальных элементов с помощью атомно-эмиссионного спектрометра с индуктивно-связанной плазмой (АЭС-ИСП) ICPE-9000 (Shimadzu, Япония) [98–100].

В условиях неполноты теоретических и практических знаний в отношении корректного вычислительного алгоритма все вычисления в нейросети ChemNN происходили в запрограммированном сервисе обучения Learning с циклическим реверсивным варьированием CSI-процедуры. Нейросеть ChemNN выполняла статистическую обработку цифровых данных с использованием последовательных процедур регрессионного, корреляционного, кластерного и дискриминантного анализов. Это позволяло беспрепятственно в промежутках между повторными циклами вычисления индексов CSIfract менять алгоритм работы заданной программы и находить корректный вариант расчета этого алгоритма. Этапы нейросетевых вычислений данной нейросети детально описаны нами ранее [101] на примере анализа агротехнических условий выращивания бархатцев в программе «Нейроцвет H1» (свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 20246669033 от 13.08.2024[4]).

Прочую статистическую обработку полученных данных выполняли с помощью прикладной системы Statistica v 10.0 (StatSoft Inc., США) и языка программирования Python 3.10. Использовали дисперсионный ANOVA-анализ, кластерный анализ и анализ главных компонент. Доверительную вероятность устанавливали на уровне 95 % (p ⩽ 0,05). Для попарного сравнения средних значений применяли критерий Тьюки (HSD-тест). В таблицах данные представлены в виде M ± SD (среднее ± стандартное отклонение); значения, обозначенные различными надстрочными латинскими буквами, статистически достоверно отличаются друг от друга (p ⩽ 0,05) согласно выбранному критерию.

3. Результаты и обсуждения

Метод парусности для определения качества семян показал, что только 60 % семян были пригодны для посева, всхожесть же посаженных составила 50 %.

Как и ожидалось, наименьшие показатели роста и развития стевии были зафиксированы на контроле. Добавление минеральных удобрений позволило увеличить урожай на 54 %, а зоогумуса — на 66 % (Рисунок 3). При этом прибавка по высоте была отмечена лишь на фоне органики и составила 29 % по сравнению с контролем. Учитывая соотношение веса побега к его высоте, наибольшее значение получено на варианте с $N_{64}P_{64}K_{64}$ — 1,3. Растения в этом варианте были такие же приземистые, как на контроле, но более кустистые. На фоне зоогумуса данный показатель незначительно уступал минеральному удобрению и равнялся 1,1. Однако усвоение элементов питания, в частности азота, по всей видимости, происходило быстрее за счет наличия в составе зоогумуса гормоноподобных веществ. Таким образом, растение переключало программу своего развития с наращивания корневой системы для поиска источников пищи на более быстрый рост надземной зеленой биомассы.

Накопление биомассы отразилось и в синтезе общего хлорофилла. SPAD показал наибольшее значение индекса на варианте с зоогумусом (Рисунок 4). Основываясь на работе Chumthong с соавторами [102], также описывающей выращивание стевии в вегетационных сосудах, мы вывели примерный усредненный коэффициент пересчета значений в мг/г, в результате чего удалось приблизительно рассчитать количество экстрагируемого хлорофилла, выраженного на основе веса. Для контроля оно составило 7,06 мг/г, для минеральных удобрений — 7,94 мг/г, для зоогумуса — 8,45 мг/г.

При экстракции сухих листьев был зафиксирован выход 9 незаменимых и 8 заменимых аминокислот (Таблица 3). В среднем по вариантам отмечена высокая доля синтеза глутамина (15,1 %). Далее шли пролин (10,8 %), серин (9,3 %) и изолейцин (8,9 %). Глутамин как гомолог аспарагина наряду с аргинином участвует в усвоении и запасе азота, влияя тем самым на формирование C–N остова растения.

[4] Лоскутов, С. И., Воробьев, Н. И., Пухальский, Я. В. Нейросетевая программа для экологической экспертизы условий развития цветочно-декоративных растений «Нейроцвет H1» / Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 20246669033 от 13.08.2024. Заявка № 2024667596 от 22 июля 2024 ГАОУ ВО Ленинградской области ЛГУ им. А. С. Пушкина.

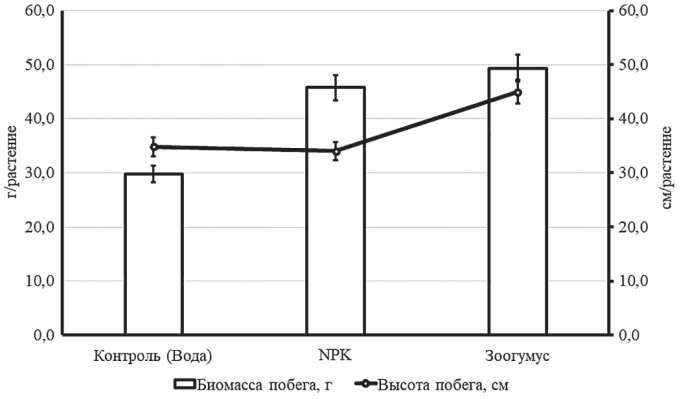


Рисунок 3. **Морфометрические показали развития стевии в вегетационном опыте с разным удобрительным фоном**
Figure 3. **Morphometric indicators of the stevia development in the vegetation experiment with different fertilization backgrounds**

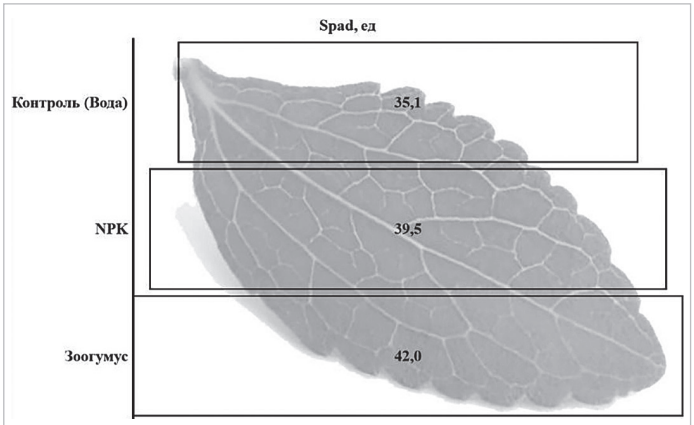


Рисунок 4. **Содержание общего хлорофилла (единица SPAD) в листьях стевии**
Figure 4. **Total chlorophyll content (SPAD unit) in stevia leaves**

Данный амид также является сигнальным нейромедиатором в иммунной системе растений [103,104]. В нормальных условиях он участвует в прорастании семян, ассимиляции неорганического азота [105] и архитектонике развития (ризогенезе) корневой системы для улучшения питания растений [106]. В условиях стресса глутамин отвечает за повышение устойчивости. Другой стресс-протекторной аминокислотой, в биосинтезе которой участвует глутамин, является пролин. Не удивительно, что на дендрограмме кластерного родства они расположены в одном гомогенном ряду (Рисунок 5).

Аккумуляция пролина направлена на поддержание в клетках водного гомеостаза и тургора [107]. Насыщение тканей водой помогает им оставаться гибкими и эластичными. Обе аминокислоты стимулируют синтез коллагенового белка в культурах человеческих дермальных фибробластов [108–110]. Поэтому увеличение их доступности в листьях стевии имеет решающее значение в процессе создания на их основе ранозаживляющих кремов. Серин участвует в синтезе липидов, а также является строительным блоком для синтеза других аминокислот. У растений существует три пути его биосинтеза [111]. Один из них, промежуточный фосфорилированный путь, связан с фотодыханием. Поэтому содержание серина в растениях строго регулируется. Что касается изолейцина, то данная аминокислота является предшественником активной молекулы фитогормона жасмоната, необходимого растениям для защиты от биотических и абиотических стрессов [112]. Повышение уровня его концентрации в тканях может означать увеличение продолжительности фаз вегетации культуры и синтеза стевиолгликозидов [113,114]. В результате растение будет накапливать больше зеленой биомассы и сладких гликозидов. На примере мутанта *Arabidopsis* было показано, что дефицит изолейцина нарушает развитие корней и изменяет уровни транскрипции генов, участвующих в метаболизме аминокислот с разветвленной цепью и глюкозинолатов [115]. Изолейцин также является резервом для синтеза аланина [116], участвующего в многочисленных реакциях растений на стресс [117]. Подытожив все вышесказанное, можно заключить, что оба типа удобрений повышают адаптационный потенциал растений культуры за счет увеличения синтеза в ней данных аминокислот.

Для организма человека наибольший интерес представляет оценка накопления в биомассе растительной пищи незаменимых аминокислот. Добавление в субстрат органики способствовало большему суммарному их выходу, чем внесение NPK (Рисунок 6). Также это отмечено по индексу соотношения их с заменимыми формами.

Среди жирных кислот в листьях стевии удалось идентифицировать 7 компонентов (Таблица 3). В среднем по вариантам опыта

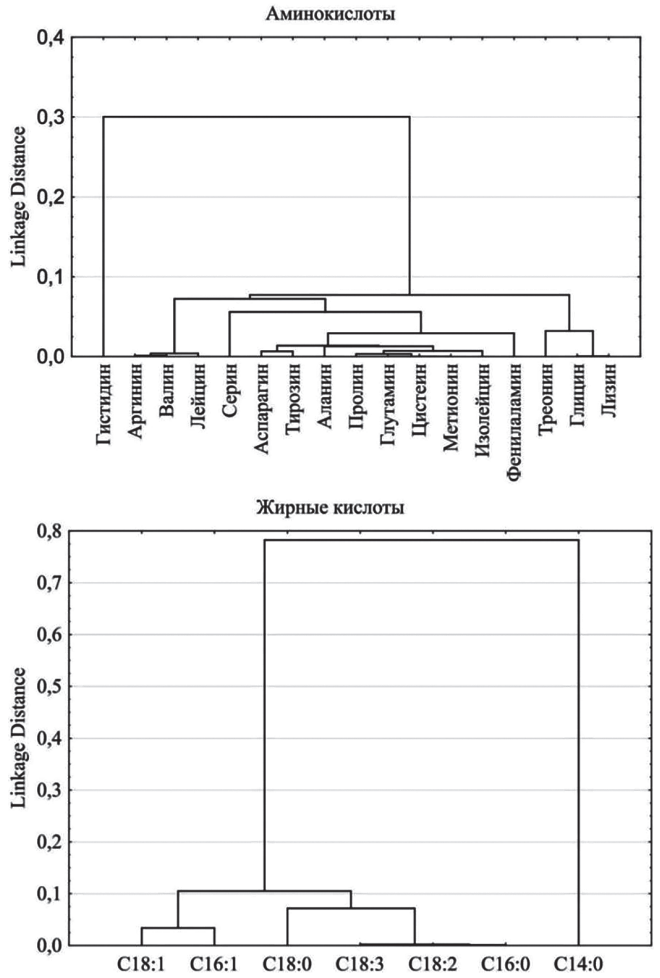


Рисунок 5. **Дендрограммы кластерного родства компонентов в биохимическом профиле стевии**

Figure 5. **Dendrograms of the cluster relationship of the components in the biochemical profile of** *Stevia rebaudiana*

Таблица 3. **Биохимический профиль экстрактов из сухой зеленой биомассы стевии**

Table 3. **Biochemical profile of the extracts from dry green biomass of** ***Stevia rebaudiana***

Аминокислоты, г/100 г или %				Жирные кислоты, г/100 г			
Компонент	**Контроль (Вода)**	**NPK**	**Зоогумус**	**Компонент**	**Контроль (Вода)**	**NPK**	**Зоогумус**
Незаменимые (НАК)				Насыщенные (НЖК)			
Лизин	0,53 ± 0,03^{b}	0,23 ± 0,01^{a}	0,99 ± 0,06^{c}	Миримистиновая (C14:0)	0,88 ± 0,24^{ab}	0,63 ± 0,17^{a}	1,55 ± 0,42^{b}
Фенилаланин	0,51 ± 0,04^{a}	0,61 ± 0,05^{a}	1,03 ± 0,09^{b}	Пальмитиновая (C16:0)	27,51 ± 3,13^{a}	28,37 ± 3,22^{a}	28,61 ± 3,25^{a}
Треонин**	0,68 ± 0,06^{b}	0,10 ± 0,010^{a}	0,95 ± 0,09^{c}	Стеариновая (C18:0)	1,18 ± 0,28^{a}	2,55 ± 0,61^{b}	1,85 ± 0,44^{ab}
Лейцин**	0,63 ± 0,06^{a}	0,55 ± 0,05^{a}	1,31 ± 0,12^{b}				
Изолейцин**	0,64 ± 0,05^{a}	1,77 ± 0,15^{b}	1,96 ± 0,16^{b}				
Метионин	0,11 ± 0,02^{a}	1,26 ± 0,26^{b}	1,11 ± 0,23^{b}				
Цистеин**	0,01 ± 0,01^{a}	0,10 ± 0,01^{b}	0,09 ± 0,01^{b}				
Валин	0,67 ± 0,06^{a}	0,63 ± 0,06^{a}	1,01 ± 0,09^{b}				
Гистидин**	0,17 ± 0,02^{a}	0,98 ± 0,11^{b}	0,10 ± 0,01^{a}				
Заменимые (ЗАК)				Ненасыщенные (ННЖК)			
Пролин**	0,58 ± 0,03^{a}	2,67 ± 0,16^{c}	2,25 ± 0,13^{b}	Пальмитолеиновая (C16:1)	1,14 ± 0,24^{a}	2,33 ± 0,49^{b}	1,04 ± 0,19^{a}
Глицин**	0,52 ± 0,05^{b}	0,18 ± 0,02^{a}	0,87 ± 0,08^{c}	Олеиновая (C18:1)	4,69 ± 0,83^{a}	8,83 ± 1,68^{b}	4,89 ± 0,93^{a}
Аланин	0,63 ± 0,05^{a}	0,83 ± 0,07^{ab}	0,93 ± 0,08^{b}	Линолевая (C18:2)	12,40 ± 3,02^{a}	18,37 ± 4,47^{b}	18,01 ± 1,93^{b}
Серин	0,86 ± 0,04^{a}	2,04 ± 0,10^{c}	1,33 ± 0,07^{b}	Линоленовая (C18:3)	27,51 ± 2,49^{a}	27,70 ± 3,19^{a}	28,22 ± 3,25^{a}
Тирозин	0,27 ± 0,02^{a}	0,38 ± 0,03^{ab}	0,50 ± 0,03^{b}				
Аргинин**	0,56 ± 0,03^{b}	0,43 ± 0,02^{a}	1,02 ± 0,06^{c}				
Глутамин	0,48 ± 0,01^{a}	4,09 ± 0,02^{c}	3,58 ± 0,02^{b}				
Аспарагин**	0,47 ± 0,01^{a}	1,16 ± 0,01^{b}	2,11 ± 0,01^{c}				

Примечание: данные представлены в виде M ± SD. Значения, обозначенные разными надстрочными латинскими буквами (a, ab, b, c), статистически достоверно отличаются друг от друга ($p \leq 0,05$) согласно постхок-тесту Тьюки (HSD). Одинаковые буквы указывают на отсутствие статистически значимых различий ($p > 0,05$). Символами (**) отмечены показатели с высокозначимыми различиями ($p \leq 0,001$): аспарагин, цистеин, лизин, пролин, серин, гистидин, аргинин, треонин, глицин, изолейцин.

среди них доминировала пальмитиновая кислота (C16:0), что согласуется с другими источниками [118]. В наименьшем количестве была представлена миристиновая кислота (C14:0). Кластерный анализ позволил выделить ее в отдельный независимый ряд (Рисунок 5). Исследования показали, что миристиновая кислота обладает различными полезными для здоровья свойствами, включая антимикробное и противовоспалительное действие [119]. Кислота демонстрирует уникальные физиологические свойства по сравнению с другими насыщенными жирными кислотами. Потребление кислоты положительно коррелирует с концентрациями клеточных биоактивных липидов, включая n-3 полиненасыщенные жирные кислоты (n-3 ПНЖК) и церамид. Это является результатом миристоилирования N-концевых остатков глицина некоторых ферментов у млекопитающих, таких как НАДН-цитохром b5-редуктаза и дигидроцерамид Δ4-десатураза [120]. Разработанные производные миристиновой кислоты были синтезированы путем преобразования миристиновой кислоты в миристоилхлорид и связывания его с ариламинами для получения соответствующих производных миристиновой кислоты. В противогрибковой оценке *in vitro* производные миристиновой кислоты оценивались против штаммов *Candida albicans* и *Aspergillus niger* путем определения их минимальных ингибирующих концентраций (50 мкг/мл) [121].

Также листья стевии были богаты линолевой (C18:2) и линоленовой (C18:3) кислотами. Расчет индекса соотношения данных полиненасыщенных омега жирных кислот (ω-6/ω-3) показал небольшое повышение его значений на двух удобрительных фонах по сравнению с контролем на воде за счет равнозначного увеличения синтеза обоих компонентов. Возрастание их концентраций при употреблении в конечном пищевом продукте важно при развитии головного мозга, органов зрения, половых желез, почек, кожи. Они также предотвращают риск развития гипертонических заболеваний сердца, включая коронарную недостаточность [122,123]. Их баланс в лекарственных и пищевых растениях должен находиться в диапазоне 1:1–2. При этом современные западные методы ведения сельского хозяйства направлены на увеличение накопления в продуктах линолевой кислоты, входящей в группу омега-6 жирных кислот [124], что приводит к дефициту в рационе питания линоленовой омега-3 кислоты, которая может препятствовать распространению в организме клеток злокачественных образований [125,126]. Предполагается, что все ННЖК в рационе могут снижать уровень холестерина липопротеинов низкой плотности, тогда как все НЖК, напротив, способствуют его повышению. Поэтому повышение показателя соотношения ННЖК/НЖК при внесении в среду удобрений также можно интерпретировать улучшением качества листьев в виде диетического продукта. Зоогумус при этом незначительно уступал минеральным удобрениям (Рисунок 6).

Не обнаружено статистически значимых различий в параметрах между суммарным накоплением химических элементов после внесения минеральных и органических удобрений. Среди преобладающих эссенциальных макроэлементов в суммарном пуле их содержания, в биомассе растений, можно выделить возрастание доли накопления калия, кальция, магния и фосфора при добавлении органики и минеральных удобрений (Таблица 4). Полученные значения были сопоставлены с МР 2.3.1.0253–21[5], ТР ТС 021/2011[6], а также с референсными значениями EFSA [127] и рекомендациями (целевой

[5] Методические рекомендации МР 2.3.1.0253-21 «Нормы физиологических потребностей в энергии и пищевых веществах для различных групп населения Российской Федерации» (утв. Федеральной службой по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека 22 июля 2021 г.) Электронный ресурс https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/402716140/. Дата доступа 25.01.2026

[6] Технический регламент Таможенного союза ТР ТС 021/2011 «О безопасности пищевой продукции»: утвержден решением Комиссии Таможенного союза от 9 декабря 2011 года N 880; дата введения 01.07.2013. Электронный ресурс https://docs.cntd.ru/document/902320560. Дата доступа 25.01.2026

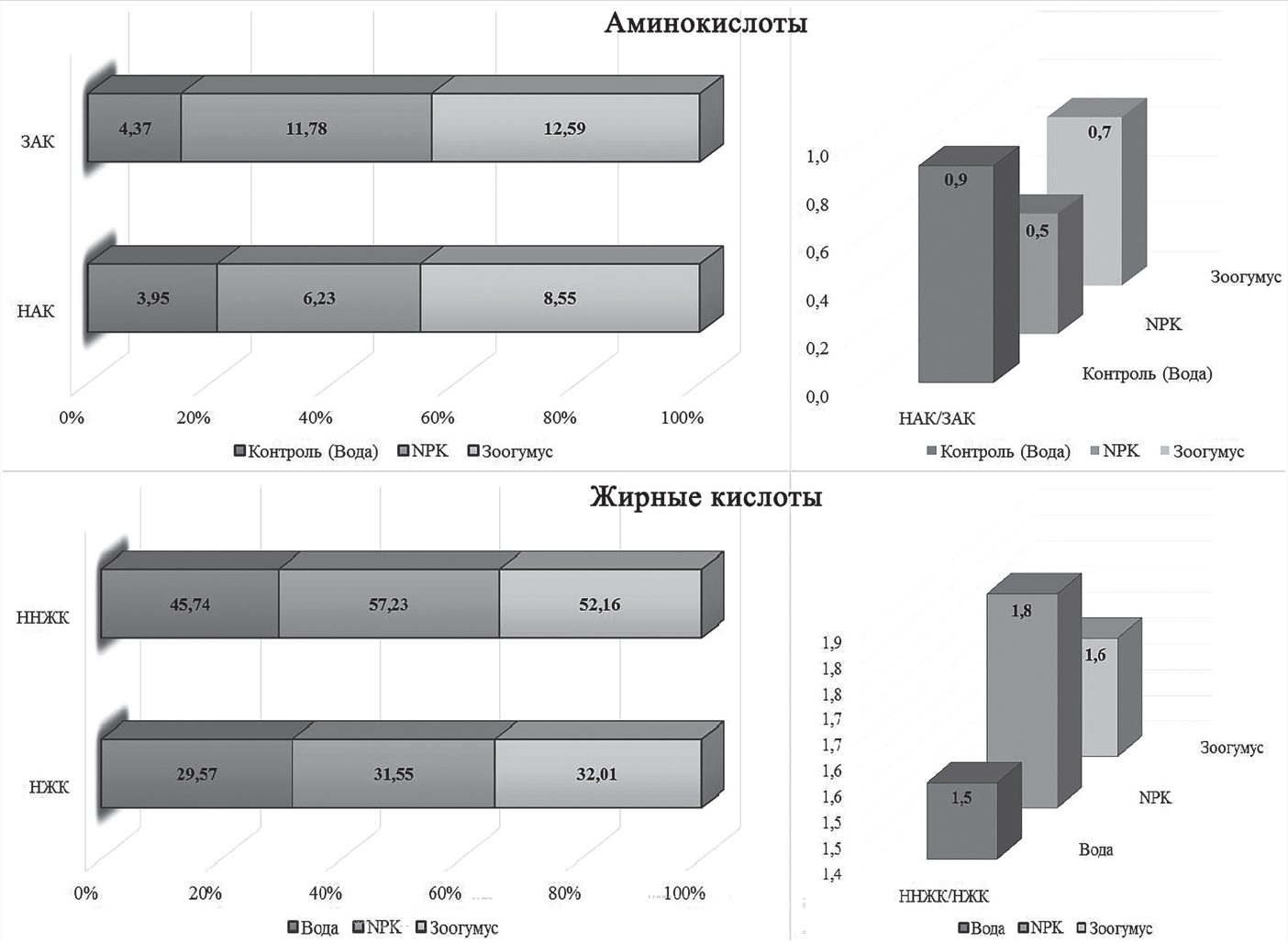


Рисунок 6. **Суммарный выход амино- и жирных кислот в листьях стевии по вариантам опыта и соотношение компонентов во фракциях**

Figure 6. **Total yield of amino acids and fatty acids in stevia leaves by variants of the experiment and the ratio of the components in the fractions**

уровень) ВОЗ/ФАО [128]. Расчет суточного поступления элементов проводился исходя из типичной дозы применения высушенного листа стевии в качестве пищевой добавки или ингредиента чайных напитков — 1–5 г/сут. Макроэлементный состав листьев во всех вариантах опыта (Ca 494–633, P 230–322, Na 85–119, K 1394–2026, Mg 268–370 мг/100 г сухой массы) соответствует диапазонам, описанным в литературе для высушенных листьев *S. rebaudiana*: Ca 309–1221, P 183–403, Na 15–186, K 1083–3168, Mg 134–474 мг/100 г [2,3,36]. Для эссенциальных макроэлементов ТР ТС 021/2011[6] не устанавливает предельных уровней содержания непосредственно в пищевом растительном сырье; регламентирование безопасности осуществляется через верхние допустимые уровни суточного потребления (ВДУСП) [129]: Ca — 2500 мг/сут; P — 3000 мг/сут; Mg — 250 мг/сут (только из добавок; из пищевых источников ВДУСП не установлен); K — ВДУСП не установлен ввиду низкой токсичности при пероральном потреблении [130]; Na — целевой уровень < 2000 мг/сут [128] (профилактика ССЗ, не токсикологический ВДУСП). При потреблении 1 г листьев в сутки вклад каждого элемента в ВДУСП составляет: Ca — не более 0,25 % от ВДУСП (4,9–6,3 мг из 2500 мг); P — не более 0,11 % от ВДУСП (2,3–3,2 мг из 3000 мг); Mg — < 1,5 % от ВДУСП по добавкам (2,7–3,7 мг из 250 мг); Na — не более 0,06 % от целевого уровня (0,9–1,2 мг из 2000 мг) [128]. Вклад 1 г листьев в рекомендуемые нормы потребления (РНП) (МР 2.3.1.0253–21[5]): K — 1,4–2,0 % от РНП (2500 мг/сут); Ca — 0,5–0,6 % от РНП (1000 мг/сут); Mg — 0,7–0,9 % от РНП (400 мг/сут), нутрициологически значимый, но не создающий риска превышения ВДУСП вклад. Среди микроэлементов особого рассмотрения заслуживает марганец (Mn), содержание которого в листьях стевии составило 22,8–48,0 мг/100 г — значения, характерные для данного вида, известного как Mn-аккумулятор (литературный диапазон: 20–70 мг/100 г сухой массы). При суточном потреблении 1–2 г листьев поступление Mn составляет 0,23–0,96 мг/сут, что не превышает адекватного уровня потребления АУП (Mn = 2 мг/сут, МР 2.3.1.0253–21[5]) и существенно ниже верхнего допустимого уровня ВДУ (11 мг/сут) [131].

Таблица 4. **Содержание минеральных элементов в сухом листе стевии, мг/100 г**

Table 4. **Content of minerals in the stevia dry leaves, mg/100 g**

Макроэлементы	Контроль (Вода)	NPK	Зоогумус
Кальций	494,2 ± 48,8[a]	633,4 ± 58,4[b]	582,7 ± 63,6[ab]
Фосфор	230,2 ± 24,1[a]	303,2 ± 19,8[b]	322,4 ± 18,9[b]
Натрий	84,9 ± 17,6[a]	118,9 ± 17,5[b]	89,0 ± 19,4[a]
Калий	1393,9 ± 192,5[a]	1790 ± 154,4[ab]	2026,2 ± 243,6[b]
Магний	267,8 ± 12,9[a]	369,7 ± 16,8[b]	341,4 ± 27,5[b]
Микроэлементы	**Контроль (Вода)**	**NPK**	**Зоогумус**
Железо	31,9 ± 5,1[a]	34,1 ± 5,3[a]	42,5 ± 4,9[b]
Цинк	4,4 ± 1,4[a]	2,1 ± 0,6[a]	3,2 ± 0,4[a]
Бор	2,3 ± 0,4[a]	6,5 ± 0,9[b]	3,8 ± 0,6[a]
Медь	0,8 ± 0,1[b]	0,4 ± 0[a]	0,4 ± 0,1[a]
Марганец	22,8 ± 2,8[a]	40,1 ± 4,1[b]	48,0 ± 3,1[c]

Примечание: данные представлены в виде M ± SD. Значения, обозначенные разными надстрочными латинскими буквами (a, ab, b, c), статистически достоверно отличаются друг от друга ($p \leq 0,05$) согласно постхок-тесту Тьюки (HSD). Одинаковые буквы указывают на отсутствие статистически значимых различий ($p > 0,05$). Отсутствие достоверных различий между NPK и зоогумусом по суммарному пулу элементов свидетельствует о сопоставимой питательной ценности органического удобрения.

Содержание железа (Fe 31,9–42,5 мг/100 г) при потреблении 1 г/сут обеспечивает до 5,3 % РНП (МР 2.3.1.0253–21[5]) для женщин (18 мг/сут) — пищевой вклад, актуальный для профилактики железодефицитных состояний. Значения бора (B 2,3–6,5 мг/100 г) и меди (Cu 0,4–0,8 мг/100 г) при типичных дозах использования стевии (< 0,13 мг B/сут и < 0,016 мг Cu/сут) остаются в десятки раз ниже ВДУСП [129]: B ≤ 10 мг/сут; Cu ≤ 5 мг/сут), а содержание цинка (Zn 2,1–4,4 мг/100 г) при разовом поступлении < 0,09 мг/сут не превышает 1 % от РНП (МР 2.3.1.0253–21[5]) (Zn 12 мг/сут). Тяжелые металлы (Pb, Cd, As, Hg) в исходном сырье зоогумуса (Таблица 2) находились в пределах регламентируемых ТР ТС 021/2011[6] значений (Pb ≤ 0,50, Cd ≤ 0,10, As ≤ 0,20 мг/кг), что исключает их лимитирующую роль для безопасности конечного продукта.

Фосфор является неотъемлемой частью многих гликофосфатов, таких как уридиндифосфатглюкоза (UDP-glc), молекула-донор глюкозы в синтезе дитерпеновых гликозидов. Калий действует как активатор ферментов, которые жизненно важны для создания различных пептидных связей. Повышение его содержания в растении сопровождается увеличением количества ветвей и числа плодов (семян). Магний и кальций являются вторичными питательными элементами, поэтому растения обычно больше нуждаются в потреблении калия и фосфора. Из микроэлементов в биомассе можно выделить накопление бора, железа и марганца. Бор играет ключевую роль во многих биохимических процессах в растениях, включая формирование структуры меристем и целостности мембран, транспорт углеводов, лигнификацию, синтез белков и фенолов, а также синтез нуклеиновых кислот, хлорофилла и индолилуксусной кислоты [132]. Поэтому накопление его в зеленой биомассе может быть связано с улучшением характеристик роста и развития стевии, а также с повышением количества вторичных метаболитов, включая стевиозид, как это было показано ранее на примере его экзогенного внекорневого применения в виде борной кислоты [133]. Сказывалось это и на улучшении ризогенеза [134].

В глобальных продовольственных системах, отвечающих за проявление «скрытого голода», железо является дефицитным микроэлементом. Оно также участвует в синтезе хлорофилла, тилакоидов и хлоропластов [135]. Железо включено в цикл передачи энергии внутри клеток, являясь компонентом некоторых ферментов и играя активную роль в цепи их превращений. Ранее также показана его положительная роль в усвоении культурой питательных веществ из среды в условиях *in vitro* [136] и выработки натуральных гликозидов [137] при ее нанообработках. За счет антагонистических проявлений между железом, медью и цинком в биомассе отмечено уменьшение концентрации последних двух. Марганец в растениях обычно действует как кофактор-активатор метаболических процессов. Благодаря своей способности легко менять степень окисления, марганец участвует в активности ферментов, связанных с процессами фосфорилирования, декарбоксилирования, реакциями восстановления и гидролиза. Поскольку по своей функции он схож с магнием, он также способен влиять на дыхание, синтез аминокислот, биосинтез лигнина и уровень содержания фитогормонов в растении. В фотосинтетическом механизме марганец катализирует реакцию расщепления воды в фотосистеме II. При этом, несмотря на всю важность марганца для фотосинтеза и других процессов, физиологическая значимость поглощения и распределения марганца в растениях недооценивается. Связано это прежде всего с тем, что в отличие от железа и бора, которые обычно являются неотъемлемыми компонентами ферментов, в биохимических процессах марганец часто может быть заменен другими ионами металлов [138,139]. Таким образом, хотя потребность растений в микроэлементах довольно низкая, в целом накопление их в пищевом продукте под влиянием удобрений можно рассматривать как полезный процесс.

Дисперсионный анализ выявил статистически значимые различия ($p < 0,05$) между вариантами удобрений для 23 из 37 проанализированных показателей (62,2 %). Наиболее значимые различия ($p < 0,001$) обнаружены среди профиля аминокислот: аспарагина, цистеина, лизина, пролина, серина, гистидина, аргинина, треонина, глицина и изолейина.

Корреляционный анализ выявил 3 пары сильных положительных симбатных связей ($r > 0,7$):

- Вода ↔ NPK: r = 0,9999
- Вода ↔ Зоогумус: r = 0,9979
- NPK ↔ Зоогумус: r = 0,9979

Отрицательных асимбатных корреляций не обнаружено.

Метод главных компонент был использован для оценки взаимосвязи и различий между измеренными параметрами в контрольной и экспериментальной группах растений путем визуализации всего полученного набора биохимических и морфометрических данных, взятых из отдельных вариантов. PCA-анализ позволил редуцировать размерность данных в многомерном пространстве и выявить два главных компонента (паттерна), объясняющих 100 % дисперсии всех изученных апартаментов (Рисунок 7):

- PC1 (60,52 %): отражает общую интенсивность накопления биохимических компонентов;
- PC2 (39,48 %): отражает специфические различия между вариантами удобрений.

Наибольшую нагрузку на PC1 оказывает содержание линоленовой кислоты, изолейцина, меди, фосфора и пальмитиновой кислоты.

Иерархическая кластеризация методом Уорда с евклидовой метрикой расстояния позволила оценить степень сходства между вариантами удобрений. Наименьшее расстояние наблюдается между вариантами NPK и Зоогумус, что указывает на наибольшее их сходство по комплексу показателей данных типов удобрений. Контрольный вариант при выращивании на воде наиболее отличается от варианта с использованием экстракта зоогумуса (Рисунок 8).

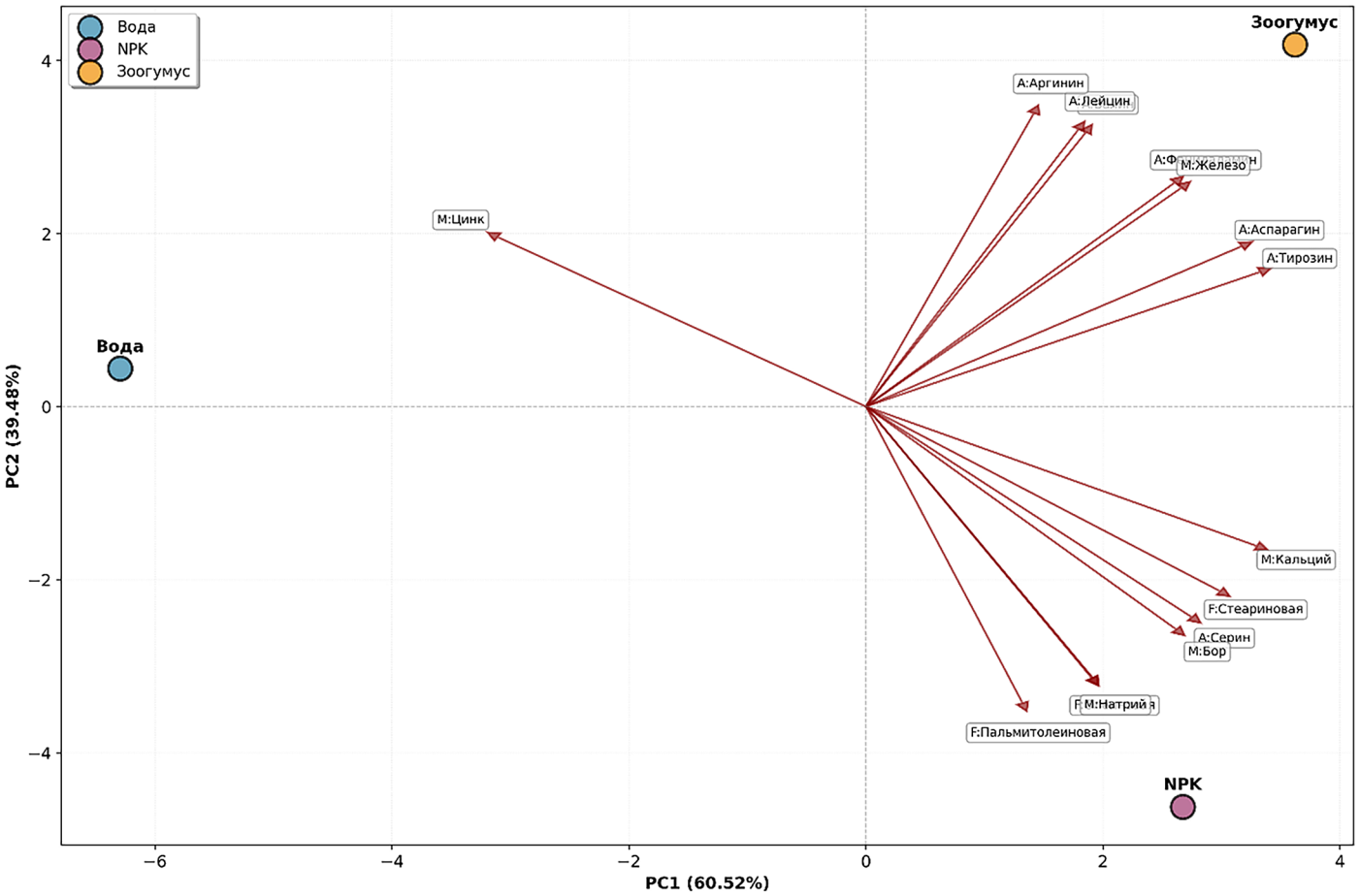


Рисунок 7. **Биплот-диаграмма анализа главных компонент (PCA) на основе данных, полученных с помощью SPAD/ГХ–МС/АЭС-ИСП, показывающая взаимосвязь между различными удобрительными фонами при выращивании *S. rebaudiana***

Figure 7. **Principal component analysis (PCA) biplot based on the data obtained using SPAD/GC–MS/ICP-AES and showing the relationship between different fertilization backgrounds when growing *S. rebaudiana***

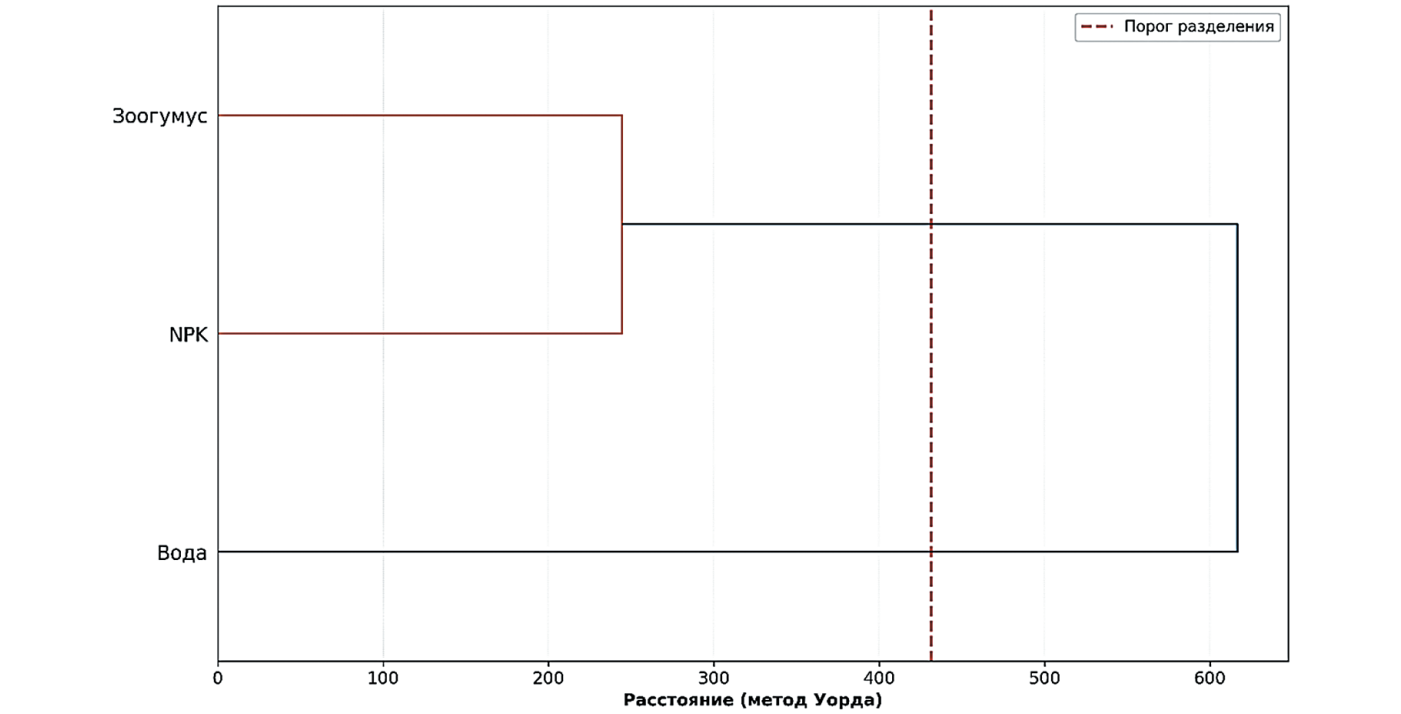


Рисунок 8. **Тепловая карта евклидовых расстояний между вариантами**

Figure 8. **Heatmap of Euclidean distances between variants**

Дополнительный расчет индексов CSIfract в нейросети показал, что применение зоогумуса вместо NPK привело к увеличению уровня консолидации питательных веществ в биомассе растений. Индекс CSIfract здесь составил 6,9 вместо 6,0, как это было на минеральном фоне (Рисунок 9).

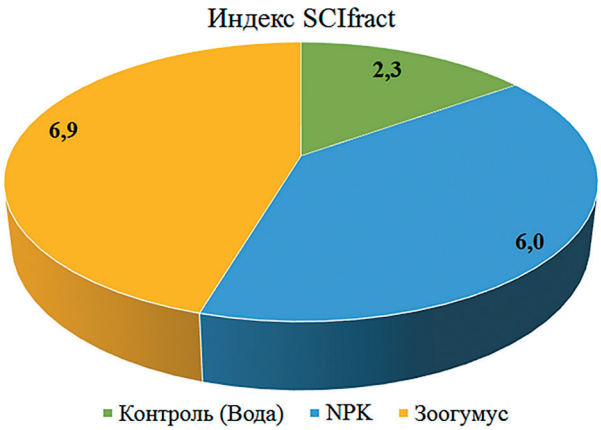


Рисунок 9. **Значения безразмерного индекса CSIfract, отображающего уровень консолидации питательных веществ в биомассе растений стевии на разных удобрительных фонах**

Figure 9. **Values of the dimensionless CSIfract index reflecting a level of nutrient consolidation in the stevia plant biomass when using different fertilization backgrounds**

4. Заключение

На основании сравнительного анализа влияния различных удобрительных фонов на урожайность и биохимический состав зеленой биомассы *S. rebaudiana*, выращиваемой в условиях агрегатопоники в течение 60 суток, сформулированы следующие выводы.

1. Экстракт зоогумуса *H. illucens* (1,0%) обеспечивает большую прибавку вегетативной биомассы (+ 66%) и высоты побегов (+ 29%) стевии по сравнению с контролем, превышая отдачу минерального удобрения NPK по высоте побегов. Это подтверждает целесообразность применения зоогумуса в технологиях выращивания стевии в защищенном грунте.
2. По совокупности биохимических показателей аминокислотного профиля достоверные различия ($p \leqslant 0{,}001$) зафиксированы в 10 из 17 аминокислот. Суммарный выход незаменимых аминокислот при применении зоогумуса превышал вариант NPK, что улучшает пищевую ценность листа стевии как сырья для пищевой и фармацевтической промышленностей.
3. Несмотря на отсутствие статистически значимых различий между NPK и зоогумусом по суммарному накоплению минеральных элементов ($p > 0{,}05$), зоогумус обеспечивает достоверно более высокое накопление калия, железа и марганца ($p \leqslant 0{,}05$).
4. В целом минеральный профиль листьев *S. rebaudiana* во всех удобрительных вариантах соответствует требованиям технических регламентов к пищевому растительному сырью и демонстрирует высокий нутрициологический потенциал культуры, особенно с точки зрения восполнения суточной потребности в K, Mg и Fe.
5. Нейросетевой анализ с расчетом индексов CSIfract показал, что уровень консолидации питательных веществ в биомассе стевии на зоогумусе (CSIfract = 6,9) превышает минеральный фон (CSIfract = 6,0), что позволяет рекомендовать зоогумус в качестве основного удобрения в стратегиях биофортификации и органического выращивания стевии.
6. Необходимо отметить, что оценка содержания стевиолгликозидов в листьях растений не входила в задачи настоящего исследования. Изучение влияния различных удобрительных режимов на накопление целевых гликозидов (стевиозида, ребаудиозидов) является перспективным направлением для последующих работ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / REFERENCES

1. Синявина, Н. Г., Кочетов, А. А., Егорова, К. В. (2022). Стевия (*Stevia rebaudiana* Bertoni): биологические особенности и факторы, влияющие на рост растений и накопление сладких гликозидов. *Ученые записки Казанского университета. Серия: Естественные науки*, 164(1), 46–75. [Sinyavina, N. G., Kochetov, A. A., Egorova, K. V. (2022). Stevia (*Stevia rebaudiana Bertoni*): Biological properties and factors affecting plant growth and sweet glycosides accumulation. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennye Nauki*, 164(1), 46–75. (In Russian)] https://doi.org/10.26907/2542-064X.2022.1.46-75
2. Lemus-Mondaca, R., Vega-Gálvez, A., Zura-Bravo, L., Ah-Hen, K. (2012). Stevia rebaudiana Bertoni, source of a highpotency natural sweetener: A comprehensive review on the biochemical, nutritional and functional aspects. *Food Chemistry*, 132(3), 1121–1132. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.11.140
3. Abou-Arab, A. E., Abou-Arab, A. A., Abu-Salem, M. F. (2010). Physio-chemical assessment of natural sweeteners stevioside produced from *Stevia rebaudiana* Bertoni plant. *African Journal of Food Science*, 4(5), 269–281. https://doi.org/10.21608/jfds.2009.115819
4. Samuel, P., Ayoob, K. T., Magnuson, B. A., Wölwer-Rieck, U., Jeppesen, P. B., Rogers, P. J. et al. (2018). Stevia leaf to stevia sweetener: Exploring its science, benefits, and future potential. *Journal of Nutrition*, 148(7), 1186S-1205S. https://doi.org/10.1093/jn/nxy102
5. Dhanish, D., Junia, G. (2019). Remedial potentials of sweet leaf a review on *Stevia rebaudiana*. *International Journal of Pharmaceutical Sciences Review and Research*, 54, 91–95.
6. Žlabur, J. Š., Voca, S., Dobricevic, N., Ježek, D., Bodiljkov, T., Brnčić, M. (2013). Stevia rebaudiana Bertoni — a review of nutritionaland biochemical properties of natural sweetener. *Agriculturae Conspectus Scientificus*, 78, 25–30.
7. Basharat, S., Huang, Z., Gong, M., Lv, X., Ahmed, A., Hussain, I. et al. (2021). A review on current conventional and biotechnical approaches to enhance biosynthesis of steviol glycosides in *Stevia rebaudiana*. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 30, 92–104. https://doi.org/10.1016/j.cjche.2020.10.018
8. Myint, K.Z., Wu, K., Xia, Y., Fan, Y., Shen, J., Zhang, P. et al. (2020). Polyphenols from *Stevia rebaudiana* (Bertoni) leaves and their functional properties. *Journal of Food Science*, 85(2), 240–248. https://doi.org/10.1111/1750-3841.15017
9. Goyal, S. K., Samsher, Goyal, R. K. (2010). Stevia (*Stevia rebaudiana*) a bio-sweetener: A review. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 61(1), 1–10. https://doi.org/10.3109/09637480903193049
10. Salvador-Reyes, R., Sotelo-Herrera, M., Paucar-Menacho, L. (2014). Estudio de la Stevia (*Stevia rebaudiana* Bertoni) como edulcorante natural y su uso en beneficio de la salud. *Scientia Agropecuaria*, 5, 157–163. [Salvador-Reyes, R., Sotelo-Herrera, M., Paucar-Menacho, L. (2014). Study of Stevia (*Stevia rebaudiana* Bertoni) as a natural sweetener and its use in benefit of the health. *Scientia Agropecuaria*, 5, 157–163. (In Spanish)] https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2014.03.06
11. Chatsudthipong, V., Muanprasat, C. (2009). Stevioside and related compounds: Therapeutic benefits beyond sweetness. *Pharmacology and Therapeutics*, 121(1), 41–54. https://doi.org/10.1016/j.pharmthera.2008.09.007
12. Amchra, F. Z., Al Faiz, C., Chaouqi, S., Khiraoui, A., Benhmimou, A., Guedira, T. (2018). Effect of *Stevia rebaudiana*, sucrose and aspartame on human health: A comprehensive review. *Journal of Medicinal Plants Studies*, 6, 102–108.
13. Каххорова, С. И. К., Кароматов, И. Д. (2017). Пищевое и лекарственное растение стевия (обзор литературы). *Биология и интегративная медицина*, 11, 107–125. [Kahkhorova, S. I. K., Karomatov, I. D. (2017). Food and herb stevia (review of literature). *Biology and Iintegrative Medicine,* 11, 107–125. (In Russian)]
14. Sharma, S., Walia, S., Singh, B., Kumar, R. (2016). Comprehensive review on agro technologies of low-calorie natural sweetener stevia (*Stevia rebaudiana* Bertoni): A boon to diabetic patients. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 96(6), 1867–1879. https://doi.org/10.1002/jsfa.7500
15. Patel, S., Navale, A. (2024). The natural sweetener stevia: An updated review on its phytochemistry, health benefits, and anti-diabetic study. *Current Diabetes Reports*, 20(2), Article e010523216398. https://doi.org/10.2174/1573399819666230501210803
16. Arumugam, B., Subramaniam, A., Alagaraj, P. (2020). Stevia as a natural sweetener: A review. *Cardiovascular and Hematological Agents in Medicinal Chemistry*, 18(2), 94–103. https://doi.org/10.2174/1871525718666200207105436
17. Aranda-González, I., Segura-Campos, M., Moguel-Ordoñez, Y., Betancur-Ancona D. (2014). *Stevia rebaudiana* Bertoni. Un potencial adyuvante en el tratamiento de la diabetes mellitus. *CyTA — Journal of Food*, 12(3), 218–226. [Aranda-González, I., Segura-Campos, M., Moguel-Ordoñez, Y., Betancur-Ancona D. (2014). *Stevia rebaudiana* Bertoni: A potential adjuvant in the treatment of diabetes mellitus. *CyTA — Journal of Food*, 12(3), 218–226. (In Spanish)] https://doi.org/10.1080/19476337.2013.830150
18. Anton, S. D., Martin, C. K., Han, H., Coulon, S., Cefalu, W. T., Geiselman, P. et al. (2010). Effects of stevia, aspartame, and sucrose on food intake, satiety, and postprandial glucose and insulin levels. *Appetite*, 55(1), 37–43. https://doi.org/10.1016/j.appet.2010.03.009
19. Ahmed, S. R., Mukta, S. (2017). Review on *Stevia rebaudiana* as a non-caloric natural sweetener producing plant. *Journal of the Sylhet Agricultural University*, 4(1), 15–25.
20. Ahmad, J., Khan, I., Blundell, R., Azzopardi, J. I., Mahomoodally, F. (2020). *Stevia rebaudiana* B.: An updated review of its health benefits, industrial applications and safety. *Trends in Food Science and Technology*, 100, 177–189. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.04.030
21. Purkayastha, S., Markosyan, A., Prakash, I., Bhusari, S., Pugh, G., Lynch, B. Jr. et al. (2016). Steviol glycosides in purified stevia leaf extract sharing the same metabolic fate. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 77, 125–133. https://doi.org/10.1016/j.yrtph.2016.02.015
22. Pol, J., Hohnova, B., Hyotylainen, T. (2007). Characterisation of *Stevia rebaudiana* by comprehensive two-dimensional liquid chromatography time-of-flight mass spectrometry. *Journal of Chromatography A*, 1150(1–2), 85–92. https://doi.org/ https://doi.org/10.1016/j.chroma.2006.09.008

23. Suttajit, M., Vinitketkaumnuen, U., Meevatee, U., Buddhasukh, D. (1993). Mutagenicity and human chromosomal effect of stevioside, a sweetener from *Stevia rebaudiana Bertoni. Environmental Health Perspectives,* 101(suppl 3), 53–56. https://doi.org/10.1289/ehp.93101s353
24. Barriocanal, L. A., Palacios, M., Benitez, G., Benitez, S., Jimenez, J. T., Jimenez, N. et al. (2008). Apparent lack of pharmacological effect of steviol glycosides used as sweeteners in humans. A pilot study of repeated exposures in some normotensive and hypotensive individuals and in Type 1 and Type 2 diabetics. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 51(1), 37–41. https://doi.org/10.1016/j.yrtph.2008.02.006
25. Jeong, I.-Y., Lee, H.-J., Jin, G.-H., Park, Y.-D., Choi, D.-S., Kang, M.-A. (2010). Anti-inflammatory activity of *Stevia rebaudiana* in LPS-induced RAW 264.7 cells. *Journal of Food Science and Nutrition*, 15(1), 14–18. https://doi.org/10.3746/jfn.2010.15.1.014
26. Arya, A., Kumar, S., Kasana, M. S. (2012). Anti-inflammatory activity of in vitro regenerated calli and in vivo plant of *Stevia rebaudiana* (Bert.) Bertoni. *International Journal of Scientific and Research Publications,* 2(8), 1–5.
27. Papaefthimiou, M., Kontou, P. I., Bagos, P. G., Braliou, G. G. (2023). Antioxidant activity of leaf extracts from *Stevia rebaudiana* Bertoni exerts attenuating effect on diseased experimental rats: A systematic review and meta-analysis. *Nutrients*, 15(15), Article 3325. https://doi.org/10.3390/nu15153325
28. Ruiz-Ruiz, J. C., Moguel-Ordoñez, Y. B, Matus-Basto A. J., Segura-Campos M. R. (2015). Antidiabetic and antioxidant activity of *Stevia rebaudiana* extracts (Var. Morita) and their incorporation into a potential functional bread. *Journal of Food Science and Technology*, 52(12), 7894–7903. https://doi.org/10.1007/s13197-015-1883-3
29. Ghanta, S., Banerjee, A., Poddar, A., Chattopadhyay, S. (2008). Oxidative DNA damage preventive activity and anti-oxidant potential of *Stevia rebaudiana* (Bertoni) Bertoni, a natural sweetener. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 55(26), 10962–10967. https://doi.org/10.1021/jf071892q
30. Shukla, S., Mehta, A., Mehta, P., Bajpai, V. K. (2012). Antioxidant ability and total phenolic content of aqueous leaf extract of *Stevia rebaudiana* Bert. *Experimental and Toxicologic Pathology*, 64(7–8), 807–811. https://doi.org/10.1016/j.etp.2011.02.002
31. Rao, G. N., Rao, P. P., Balaswamy, K., Satyanarayana, A. (2014). Antioxidant activity of stevia (*Stevia rebeudiana* L.) leaf powder and a commercial stevioside powder. *Journal of Food and Pharmaceutical Sciences*, 2(2), 32–38.
32. Kedik, S. A., Yartsev, E. I., Stanishevskaya, I. E. (2009). Antiviral activity of dried extract of Stevia. *Pharmaceutical Chemistry Journal*, 43(4), 198–199.
33. Iawsipo, P., Somana, J., Patthamawan, P., Kaewmahatthai, T., Roy, S. (2024). Exploring stevia leaf residue extracts: Antibacterial and antioxidant potential as natural food preservatives. *Trends in Sciences*, 21(9), Article 8113. https://doi.org/10.48048/tis.2024.8113
34. Kim, I.-S., Yang, M., Lee, O.-H., Kang, S.-N. (2011). Theantioxidant activity and the bioactive compound content of *Stevia rebaudiana* water extracts. *LWT — Food Science and Technology*, 44(5), 1328–1332. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2010.12.003
35. Das, K. (2013). Wound healing potential of aqueous crude extract of *Stevia rebaudiana* in mice. *Revista Brasileira de Farmacognosia*, 23(2), 351–357. https://doi.org/10.1590/s0102-695x2013005000011
36. Gupta, E., Purwar, S., Sundaram, S., Rai, G. K. (2013). Nutritional and therapeutic values of *Stevia rebaudiana*: A review. *Journal of Medicinal Plants Research*, 7(46), 3343–3353.
37. Abdel-Fatt, S. M., Badr, A. N., Abu Seif, F. A.-H., Mohamed Ali, S., Ahmed Hassan, R. (2018). Antifungal and anti-mycotoxigenic impact of eco-friendly extracts of wild stevia. *Journal of Biological Sciences*, 18(8), 488–499. https://doi.org/10.3923/jbs.2018.488.499
38. Ghosh, S., Subudhi, E., Nayak, S. (2008). Antimicrobial assay of *Stevia rebaudiana* Bertoni leaf extracts against 10 pathogens. *International Journal of Integrative Biology*, 2(1), 27–31.
39. Jayaraman, S., Manoharan, M., Illanchezian, S. (2008). *In-vitro* antimicrobial and antitumor activities of *Stevia rebaudiana* (*Asteraceae*) leaf extracts. *Tropical Journal of Pharmaceutical Research*, 7(4), 1143–1149. https://doi.org/10.4314/tjpr.v7i4.14700
40. Moselhy, S. S., Ghoneim, M. A., Khan, J. A. (2016). *In vitro* and *in vivo* evaluation of antimicrobial and antioxidant potential of stevia extract. *African Journal of Traditional, Complementary and Alternative Medicines*, 13(6), 18–21. https://doi.org/10.21010/ajtcam.v13i6.4
41. Chaudhary, S., Kiran, S., Sreeja, V. (2024). Functional aspects of stevia: A review. *Journal of Phytopharmacology*, 13(1), 64–69. https://doi.org/10.31254/phyto.2024.13109
42. Ntalli, N., Kasiotis, K. M., Baira, E., Stamatis, C. L., Machera, K. (2020). Nematicidal activity of *Stevia rebaudiana* (Bertoni) assisted by phytochemical analysis. *Toxins*, 12(5), Article 319. https://doi.org/10.3390/toxins12050319
43. Karimi, M., Hashemi, J., Ahmadi, A., Abbasi, A., Esfahani, M. (2014). Study on the bioactivity of steviol and isosteviol in stevia (*Stevia rebaudiana* Bertoni). *Acta Physiologiae Plantarum*, 36(12), 3243–3248. https://doi.org/10.1007/s11738-014-1690-x
44. Огороднова, У. А., Сапунова, А. С., Тимофеева, О. А., Миронов, В. Ф. (2020). Стевиозид обладает максимальной биологической активностью среди природных дитерпенов стевии. *Доклады Российской академии наук. Науки о жизни*, 492(1), 226–229. [Ogorodnova, U. A., Sapunova, A. S., Timofeeva, O. A., Mironov, V. F. (2020). Stevioside has the maximum biological activity among natural stevia diterpenes. *Doklady Biological Sciences*, 492(1), 226–229. (In Russian)] https://doi.org/10.31857/S2686738920030105
45. Синявина, Н. Г., Кочетов, А. А., Егорова, К. В., Вертебный, В. Е., Хомяков, Ю. В. (2020). Водный экстракт из листьев стевии (*Stevia rebaudiana* Bertoni) как биостимулятор роста растений в светокультуре. *Овощи России*, 6, 31–35. [Sinyavina, N. G., Kochetov, A. A., Egorova, K. V., Vertebny, V. E., Khomyakov, Yu. V. (2020). The possibility of using of an aqueous extract from stevia (*Stevia rebaudiana* Bertoni) leaves as a biostimulant of plant growth in photoculture. *Vegetable Crops of Russia*, 6, 31–35. (In Russian)] https://doi.org/10.18619/2072-9146-2020-6-31-35
46. Khiraoui, A., Bakha, M., Boulli, A., Hasib, A., Al Faiz, C. (2021). The productivity of *Stevia rebaudiana* (Bertoni) on dry leaves and steviol glycosides of four varieties grown in six regions of Morocco. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 37, Article 102151. https://doi.org/10.1016/j.bcab.2021.102151
47. Mahdavi, M., Jurado, F., Schmitt, K., Ramos R. A. V. (11–12 March, 2023). *Future heat and electricity generation from Bertoni plant in Morocco*. IEEE IAS Global Conference Renewable Energy and Hydrogen Technologies, Male, Maldives. IEEE, 2023. https://doi.org/10.1109/GlobConHT56829.2023.10087694
48. Mahdavi, M., Awaafo, A. Jurado, F. (2024). A sustainable rural electrification of morocco using stevia biomass power generation: Lessons for paraguay. *IEEE Latin America Transactions*, 22(11), 911–919. https://doi.org/10.1109/TLA.2024.10735445
49. Кочетов, А. А. (2012). Перспективы выращивания стевии [*Stevia rebaudiana* Bertoni (l.)] в нечерноземной зоне России. *Аграрная Россия*, 2, 2–4. [Kochetov, A. A. (2012). Prospects of cultivation of *Stevia rebaudiana* Bertoni (l.) in non-chernozem zone of Russia. *Agrarnaya Rossiya (Agrarian Russia),* 2, 2–4. (In Russian)] https://doi.org/10.30906/1999-5636-2012-2-2-4
50. Кочетов, А. А., Синявина, Н. Г. Стевия (*Stevia rebaudiana* Bertoni): биохимический состав, терапевтические свойства и использование в пищевой промышленности (обзор). *Химия растительного сырья*, 2, 5–27. [Kochetov, A. A., Sinyavina, N. G. (2021). Stevia (*Stevia rebaudiana* Bertoni): Biochemical composition, therapeutic properties and use in the food industry (review). *Khimija Rastitel'nogo Syr'ja*, 2, 5–27. (In Russian)] https://doi.org/10.14258/jcpim.2021027931
51. Rahmesh, K., Singh, V., Megeji, N. (2006). Cultivation of stevia (*Stevia rebaudiana* Bertoni): A comprehensive review. *Advances in Agronomy*, 89, 137–177. https://doi.org/10.1016/S0065-2113(05)89003-0
52. Kumar, R., Sood, S., Sharma, S., Kasana, R. C., Pathania, V. L., Singh, B. et al. (2013). Effect of plant spacing and organic mulch on growth, yield, and quality of natural sweetener plant stevia and soil fertility in western Himalaya. *International Journal of Plant Production*, 8(3), 311–334.
53. Pal, P.K., Kumar, R., Guleria, V., Mahajan, M., Prasad, R., Pathania, V. et al. (2015). Crop-ecology and nutritional variability influence growth and secondary metabolites of *Stevia rebaudiana* Bertoni. *BMC Plant Biology*, 15(1), Article 67. https://doi.org/10.1186/s12870-015-0457-x
54. Jarma-Orozco, A., Combatt, E. M., Polo, J. (2012). Glycoside contents depending on the nutrient deficiencies in *Stevia rebaudiana* Bert. *Revista UDCA de Actualidad y Divulgacion Cientifica*, 15(1), 107–116.
55. Büyük, G., Bayram, C. A., İnan, M., Kırpık, M. (2022). The effect of organic and inorganic fertilizers on plant nutrient content and agronomic performance of stevia. *Journal of Plant Nutrition*, 45(15), 2303–2314. https://doi.org/10.1080/01904167.2022.2063739
56. Bidabadi, S. S., Afazel, M., Poodeh, S. D. (2016). The effect of vermicompost leachate on morphological, physiological andbiochemical indices of *Stevia rebaudiana* Bertoni in a soilless culture system. *International Journal of Recyclingof Organic Waste in Agriculture*, 5(3), 251–262. https://doi.org/10.1007/s40093-016-0135-5
57. Пендюрин, Е. А., Рыбина, С. Ю., Смоленская, Л. М. (2020). Использование зоокомпоста Черной львинки в качестве органического удобрения. *Аграрная наука*, 7–8, 106–110. [Pendyurin, E. A., Rybina, S. Yu., Smolenskaya, L. M. (2020). Using the zoo compost of the Black Lioness as an organic fertilizer. *Agrarian Science*, 7–8, 106–110. (In Russian)] https://doi.org/10.32634/0869-8155-2020-340-7-106-110
58. Шинкарев, С. М., Аксенов, А. В., Тарасов, С. И. (2008). Применение зоогумуса в качестве органического удобрения в защищенном грунте. *Плодородие*, 4(43), 17–18. [Chinkarev, S. M., Aksenov, A. V., Tarasov, S. I. (2008). Application of zoohumus as organic fertilizer in the protected ground. *Plodorodie*, 4(43), 17–18.
59. Пендюрин, Е. А., Здоровцов, В. А., Рыбина, С. Ю., Святченко, А. В. (2024). Агрохимические характеристики зоокомпоста личинок насекомого Черная львинка. *Агрохимический вестник*, 3, 59–62. [Pendyurin, E. A., Zdorovtsov, V. A., Rybina, S. Yu., Svyatchenko, A. V. (2024). Agrochemical characteristics of zoocompost Black Soldier Fly larvae. *Agrochemical Herald*, 3, 59–62. (In Russian)] https://doi.org/10.24412/1029-2551-2024-3-010
60. Abd El-Wahab, M. A., Badawy, M. Y., Abd El-Aleem, W. H., Bakeer, S. M. (2022). Studying the effect of mixtures of agricultural soil on two Stevia cultivars under a hydroponic system. *Journal of Medicinal Plants Studies*, 10(2), 106–111.
61. Sangaré, M., Nemati, M. R., Fortin, J. P. (2013). Beneficial effect of coconut fiber and peat on the physical quality of nursery substrates. *Acta Horticulturae*, 1013, 175–180. https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2013.1013.20
62. Lefever, K., Laubscher, C. P., Ndakidemi, P. A., Nchu, F. (2017). Effects of pH and phosphorus concentrations on the chlorophyll responses of *Salvia chamelaeagnea* (Lamiaceae) grown in hydroponics. Chapter in a book: Chlorophyll, IntechOpen, 2026. https://doi.org/10.5772/67610
63. Kyriacou, M. C., El-Nakhel, C., Pannico, A., Graziani, G., Soteriou, G. A., Giordano, M. et al. (2020). Phenolic constitution, phytochemical and macronutrient content in three species of microgreens as modulated by natural fiber and synthetic substrates. *Antioxidants*, 9(3), Article 252. https://doi.org/10.3390/antiox9030252
64. Romano, N., Powell, A., Islam, S., Fischer, H., Renukdas, N., Sinha, A. K. et al. (2022). Supplementing aquaponics with black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae frass tea: Effects on the production and composition of sweet potato slips and sweet banana peppers. *Aquaculture*, 555, Article 758160. https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2022.738160
65. Romano, N., Fischer, H., Powell, A., Sinha, A. K., Islam, S., Deb, U. et al. (2022). Applications of black solider fly (*Hermetia illucens*) larvae frass on sweetpotato slip production, mineral content and benefit-cost analysis. *Agronomy*, 12(4), Article 928. https://doi.org/10.3390/agronomy12040928
66. Frimpong, K. A., Phares, C. A., Boateng, I., Abban-Baidoo, E., Apuri, L. (2021). One-time application of biochar influenced crop yield across three cropping cycles on tropical sandy loam soil in Ghana. *Heliyon*, 7(2), Article e06267. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06267
67. Beeby, J., Moore, S., Taylor, L., Nderitu, S. (2020). Effects of a one-time organic fertilizer application on long-term crop and residue yields, and soil quality measurements using biointensive agriculture. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 4, Article 67. https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.00067
68. Das, N., Islam, M. S., Kashem, M. A., Osman, K. (2022). Influence of one-time application of vermicompost and npk fertilizers on the growths and mineral nutrients of Indian Spinach (*Basella alba* L.). *Journal of Soil Science and Plant Nutrition,* 22(6), 2107–2121. https://doi.org/10.1007/s42729-022-00810-2

69. Wijitkosum, S., Sriburi, T., Toonsiri, P. (2025). Effect of one-time application of biochar and compost on soil and maize during five-time consecutive periods of crop cultivation. *Emerging Science Journal*, 9(1), 114–130. https://doi.org/10.28991/ESJ-2025-09-01-07
70. Atas, M., Eruygur, N., Ucar, E., Ozyigit, Y., Turgut, K. (2018). The effects of different nitrogen doses on antioxidant and antimicrobial activity of Stevia (*Stevia rebaudiana* Bert.). *Cellular and Molecular Biology*, 64(2), 39–45. https://doi.org/10.14715/cmb/2018.64.2.8
71. Śniegowska, J., Biesiada, A., Gasiński, A. (2024). Influence of the nitrogen fertilization on the yield, biometric characteristics and chemical composition of *Stevia rebaudiana* bertoni grown in poland. *Molecules*, 29(8), Article 1865. https://doi.org/10.3390/molecules29081865
72. Tavarini, S., Sgherri, C., Ranieri, A. M., Angelini, L. G. (2015). Effect of nitrogen fertilization and harvest time on steviol glycosides, flavonoid composition, and antioxidant properties in *Stevia rebaudiana* Bertoni. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 63(31), 7041–7050. https://doi.org/10.1021/acs.jafc.5b02147
73. Maniruzzaman, M., Chowdhury, M. A. H., Mohiuddin, K., Chowdhury, T. (2016). Nitrogen requirement and critical N content of stevia grown in two contrasting soils of Bangladesh. *Research in Agriculture Livestock and Fisheries*, 3(1), 87–97. https://doi.org/10.3329/ralf.v3i1.27862
74. Debarba, R. J., Deschamps, C., Kanis, L. A., Moterle, D., Rampelotti, M. (2021). Effects of nitrogen fertilization on growth and yield of diterpene glycosides in stevia (*Stevia rebaudiana* Bertoni). *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 15(1), Article e10591. https://doi.org/10.17584/rcch.2021v15i1.10591
75. Mahajan, M., Pal, P. K. (2022). Yield response, accumulation of bioactive ingredient and ion uptake of *Stevia rebaudiana* to different soil-moisture and nitrogen levels. *Agricultural Water Management*, 264, Article 107511. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107511
76. Tadesse, N. (2019). The response of stevia (*Stevia rebaudiana* L.) to nitrogen and phosphorous fertilizer rates at Menagesha, West Ethiopia. *International Journal of Environmental Sciences and Natural Resources*, 22(3), Article 556090. https://doi.org/10.19080/IJESNR.2019.22.556090
77. Maniruzzaman, M., Chowdhury, T., Rahman, M. A., Chowdhury, M. A. H. (2017). Phosphorus use efficiency and critical P content of stevia grown in acid and non-calcareous soils of Bangladesh. *Research in Agriculture Livestock and Fisheries*, 4(2), 55–68. https://doi.org/10.3329/ralf.v4i2.33717
78. Inugraha, M. D. M., Widaryanto, E. (2014). Response of stevia (*Stevia rebaudiana* Bertoni M) to nitrogen and potassium fertilization. *IOSR Journal of Agriculture and Veterinary Science*, 7(10), 47–55. https://doi.org/10.9790/2380-071014755
79. Maniruzzaman, M, Chowdhury, T., Rahman, M. A., Chowdhury, M. A. H. (2017). Potassium requirement for leaf biomass yield and K nutrition of stevia. *Fundamental and Applied Agriculture*, 2(3), 297–302. https://doi.org/10.5455/faa.276431
80. Gatie, K. D., Ali, H. A., Mohsen, K. H. (2022). Effect of nitrogen and potassium application on growth, yield, and quality of stevia (*Stevia rebaudiana* Bertoni). *Indian Journal of Ecology*, 49(18), 148–154.
81. Verma, P. P. S., Kumar, A., Padalia, R. C., Singh, V. R. (2020). Influence of NPK levels on growth and yield of *Stevia rebaudiana* Bertoni under hills of Uttarakhand. *Indian Journal of Natural Products and Resources (IJNPR)*, 11(1), 66–72.
82. Benhmimou, A., Ibriz, M., Douaik, A., Lage, M., Faïz, C.A., Chaouqi, S. et al. (2018). Effect of NPK fertilization on the growth, yield, quality and mineral nutrition of new sweet plant in Morocco (*Stevia rebaudiana* Bertoni). *American Journal of Biology and Life Sciences*, 6(3), 36–43.
83. Eslami-Firouzabadi, A., Karimi, M., Abbasi-Surki, A., Shafeinia, A., Derikvand-Moghadam, F. (2023). Optimising the rate and stages of application of nitrogen fertiliser for stevia under greenhouse conditions. *South African Journal of Plant and Soil*, 40(1), 58–63. https://doi.org/10.1080/02571862.2022.2137591
84. Кузнецова, И. В. (2015). Изучения эффективности органической технологии возделывания стевии (*Stevia rebaudiana* Bertoni). *Известия Горского государственного аграрного университета*, 52(3), 15–20. [Kuznetsova, I. V. (2015). Studies of organic technology efficiency for stevia (*Stevia rebaudiana* Bertoni) cultivation. *Proceedings of Gorsky State Agrarian University,* 52(3), 15–20. (In Russian)]
85. Warner, R.M. (2022). Influence of environmental parameters, pinching, and ethephon application on growth and branching of potted stevia. *HortScience*, 57, 81–84. https://doi.org/10.21273/HORTSCI16241-21
86. Ермаков, Е. И., Кочетов, А. А. (1996). Особенности роста и развития растений стевии при разных световых режимах в регулируемых условиях. *Доклады Российской академии сельскохозяйственных наук*, 1, 8–9. [Ermakov E. I., Kochetov A. A. (1996). Specificities feautures in growth and development of stevia plants under various light regimes in regulated conditions. *Russian Agricultural Sciences*, 22(1), 9–11. (In Russian)]
87. Sharakshane, A. (2018). An easy estimate of the PFDD for a plant illuminated with white LEDs: 1000 lx = 15 µmol/s/m^2. *BioRxiv*, Article 289280. https://doi.org/10.1101/289280
88. Romero-Figueroa, J. C., Gutiérrez-Castorena, M. del C., Peña-Valdivia, C. B., Rodríguez-Mendoza, M. de las N., Escalante-Estrada, J.A.S., Cueto-Wong, J.A. et al. (2017). Growth dynamics of Stevia cultivated in organic substrates in greenhouse. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 40(3), 341–350.
89. Ruiz-Espinoza, F. H., Murillo-Amador, B., García-Hernández, J. L., Fenech-Larios, L., Rueda-Puente, E. O., Troyo-Diéguez, E. et al. (2010). Field evaluation of the relationship between chlorophyll content in basil leaves and a portable chlorophyll meter (SPAD-502) readings. *Journal of Plant Nutrition*, 33(3), 423–438. https://doi.org/10.1080/01904160903470463
90. Uddling, J., Gelang-Alfredsson, J., Piikki, K., Pleijel, H. (2007). Evaluating the relationship between leaf chlorophyll concentration and SPAD-502 chlorophyll meter readings. *Photosynthesis Research*, 91(1), 37–46. https://doi.org/10.1007/s11120-006-9077-5
91. Radhamani, R., Kannan, R. Rakkiyappan, P. (2016). Leaf chlorophyll meter readings as an indicator for sugarcane yield under iron deficient typic haplustert. *Sugar Tech*, 18, 61–66 https://doi.org/10.1007/s12355-014-0363-9
92. Shibaeva, T. G., Mamaev, A. V. Sherudilo, E. G. (2020). Evaluation of a SPAD-502 plus chlorophyll meter to estimate chlorophyll content in leaves with interveinal chlorosis. *Russian Journal of Plant Physiology,* 67(4), 690–696. https://doi.org/10.1134/S1021443720040160
93. Zhu, J., Tremblay, N., Liang, Y. (2012). Comparing SPAD and at LEAF values for chlorophyll assessment in crop species. *Canadian Journal of Soil Science*, 92(4), 645–648. https://doi.org/10.4141/cjss2011-100
94. Samsudin, A., Aziz, I. A. (2013). Drying of stevia leaves using laboratory and pilot scale dryers. *Journal of Tropical Agriculture and Food Science*, 41(1), 137–147.
95. Periche, A., Koutsidis, G., Escriche, I. (2013). Composition of antioxidants and amino acids in stevia leaf infusions. *Plant Foods for Human Nutrition*, 69(1), 1–7. https://doi.org/10.1007/s11130-013-0398-1
96. Siddique, A. B., Mizanur Rahman, S. M., Hossain, M. A. (2016). Chemical composition of essential oil by different extraction methods and fatty acid analysis of the leaves of Stevia Rebaudiana Bertoni. *Arabian Journal of Chemistry*, 9, S1185-S1189. https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2012.01.004
97. Korobko, N. V., Turko, Y. A., Shokun, V. V., Chernyak, E. N., Pokrovskii, L. M., Smetankina, O. N. et al. (2008). GC–MS investigations. II. Lipid composition of Stevia rebaudiana. *Chemistry of Natural Compounds*, 44(3), 359–360. https://doi.org/10.1007/s10600-008-9061-8
98. Senila, M. (2024). Recent advances in the determination of major and trace elements in plants using inductively coupled plasma optical emission spectrometry. *Molecules*, 29(13), Article 3169. https://doi.org/10.3390/molecules29133169
99. Yener, I. (2019). Trace element analysis in some plants species by inductively coupled plasma optical emission spectrometry (ICP-OES). *Journal of the Institute of Science and Technology*, 9(3), 1492–1502. https://doi.org/10.21597/jist.517739
100. Hajar, E. W. I., Sulaiman, A. Z. B., Sakinah, A. M. M. (2014). Assessment of heavy metals tolerance in leaves, stems and flowers of *Stevia Rebaudiana* plant. *Procedia Environmental Sciences*, 20, 386–393. https://doi.org/10.1016/j.proenv.2014.03.049
101. Лоскутов, С. И., Пухальский, Я. В., Воробьев, Н. И., Якубовская, А. И., Каменева, И. А., Ситнов, В. Ю. (2024). Нейросетевой анализ влияния органомикробных биопрепаратов на интенсивность массонакопительных и биохимических процессов в бархатцах. *Агрохимический вестник*, 5, 63–70. [Loskutov, S. I., Puhalsky, J. V., Vorobyov, N. I., Yakubovskaya, A. I., Kameneva, I. A., Sitnov, V. Yu. (2024). Neural network analysis of the influence of organic-microbial biopreparations on the intensity of mass accumulationand biochemical processes in marigold. *Agrochemical Herald*, 5, 63–70. (In Russian)] https://doi.org/10.24412/1029-2551-2024-5-011
102. Chumthong, B., Seesanong, S., Detpiratmongkol, S. (2023). Influence of ethephon spraying on the growth and yield of Stevia (*Stevia rebaudiana* Bertoni.). *International Journal of Agricultural Technology*, 19(3), 921–930.
103. Qiu, X.-M, Sun, Y.-Y., Ye, X.-Y., Li Z.-G. (2020). Signaling role of glutamate in plants. *Frontiers in Plant Science*, 10, Article 1743. https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01743
104. Liao, H.-S., Chung, Y.-H., Hsieh, M.-H. (2022). Glutamate: A multifunctional amino acid in plants. *Plant Science*, 318, Article 111238. https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2022.111238
105. Svietlova, N., Zhyr, L., Reichelt, M., Grabe, V., Mithöfer, A. (2024). Glutamine as sole nitrogen source prevents induction of nitrate transporter gene NRT2.4 and affects amino acid metabolism in Arabidopsis. *Frontiers in Plant Science*, 15, Article 1369543. https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1369543
106. Liao, H.-S., Lee, K.-T., Chung, Y.-H., Chen, S.-Z., Hung, Y.-J., Hsieh, M.-H. (2024). Glutamine induces lateral root initiation, stress responses, and disease resistance in Arabidopsis. *Plant Physiology*, 195(3), 2289–2308. https://doi.org/10.1093/plphys/kiae144
107. Hayat, S., Hayat, Q., Alyemeni, M. N., Wani, A.S., Pichtel, J., Ahmad, A. (2012). Role of proline under changing environments: A review. *Plant Signaling and Behavior*, 7(11), 1456–1466. https://doi.org/10.4161/psb.21949
108. Murakami, H., Shimbo, K., Inoue, Y., Takino, Y., Kobayashi, H. (2012). Importance of amino acid composition to improve skin collagen protein synthesis rates in UV-irradiated mice. *Amino Acids*, 42(6), 2481–2489. https://doi.org/10.1007/s00726-011-1059-z
109. Karna, E., Miltyk, W., Wołczyński, S., Pałka, J. A. (2001). The potential mechanism for glutamine-induced collagen biosynthesis in cultured human skin fibroblasts. *Comparative Biochemistry and Physiology Part B: Biochemistry and Molecular Biology*, 130(1), 23–32. https://doi.org/10.1016/s1096-4959(01)00400-6
110. Albaugh, V. L., Mukherjee, K., Barbul, A. (2017). Proline precursors and collagen synthesis: Biochemical challenges of nutrient supplementation and wound healing. *The Journal of Nutrition*, 147(11), 2011–2017. https://doi.org/10.3945/jn.117.256404
111. Ros, R., Muñoz-Bertomeu, J., Krueger, S. (2014). Serine in plants: Biosynthesis, metabolism, and functions. *Trends in Plant Science*, 19(9), 564–569. https://doi.org/10.1016/j.tplants.2014.06.003
112. Li, Y., Li, S., Du, R., Wang, J., Li, H., Xie, D. et al (2021). Isoleucine enhances plant resistance against botrytis cinerea via jasmonate signaling pathway. *Frontiers in Plant Science*, 12, Article 628328. https://doi.org/10.3389/fpls.2021.628328
113. Montes-Palmeros, M., Alvarado-Orea, I. V., Pavón-Orozco, P., García-López, E., Huerta-Heredia, A. A. (2016). Steviol glucosides production in micropropaged seedlings of *Stevia rebaudiana* elicited with methyl jasmonate. *Mexican Journal of Biotechnology*,1(1), 113–119.
114. Moharramnejad, S., Azam, A. T., Panahandeh, J., Dehghanian, Z., Ashraf, M. (2019). Effect of methyl jasmonate and salicylic acid on in vitro growth, stevioside production, and oxidative defense system in *Stevia rebaudiana*. *Sugar Tech*, 21(6), 1031–1038. https://doi.org/10.1007/s12355-019-00727-8
115. Yu, H., Zhang, F., Wang, G., Liu, Y., Liu, D. (2013). Partial deficiency of isoleucine impairs root development and alters transcript levels of the genes involved in branched-chain amino acid and glucosinolate metabolism in Arabidopsis. *Journal of Experimental Botany*, 64(2), 599–612. https://doi.org/10.1093/jxb/ers352
116. Rouhier, K. A., Perrett, M. E., Goldfarb, M. H., Reinhart, P. E., Wilczewski-Shirai, K. C., Raymond-Schmidt, L. et al. (2019). Isoleucine serves as a precursor for the synthesis of β-alanine in plants. *The FASEB Journal*, 33(S1), Article 486 https://doi.org/10.1096/fasebj.2019.33.1_supplement.486.10
117. Parthasarathy, A., Savka, M. A., Hudson, A. O. (2019). The synthesis and role of β-alanine in plants. *Frontiers in Plant Science*, 10, Article 921. https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00921

118. Siddique, A. B., Rahman, S. M. M., Hossain, M. A. (2016). Chemical composition of essential oil by different extraction methods and fatty acid analysis of the leaves of *Stevia rebaudiana* Bertoni. *Arabian Journal of Chemistry*, 9, S1185-S1189. https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2012.01.004
119. Oepen, K., Ozbek, H., Schuffler, A., Liermann, J. C., Thines, E., Schneider, D. (2021). Myristic acid inhibits the activity of the bacterial ABC transporter Bmr A. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(24), Article 13565. https://doi.org/10.3390/ijms222413565
120. Rioux, V., Pédrono, F., Legrand, P. (2011). Regulation of mammalian desaturases by myristic acid: N-terminal myristoylation and other modulations. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) — Molecular and Cell Biology of Lipids*, 1811(1), 1–8. https://doi.org/10.1016/j.bbalip.2010.09.005
121. Javid, S., Ather, H., Hani, U., Siddiqua, A., Asif Ansari, S. M., Shanmugarajan, D. et al. (2023). Discovery of novel myristic acid derivatives as N-myristoyltransferase inhibitors: Design, synthesis, analysis, computational studies and antifungal activity. *Antibiotics*, 12(7), Article 1167. https://doi.org/10.3390/antibiotics12071167
122. Chen, J., Liu, H. (2020). Nutritional indices for assessing fatty acids: A mini-review. *International Journal of Molecular Sciences*, 21(16), Article 5695. https://doi.org/10.3390/ijms21165695
123. Берзегова, А. А. (2007). Значение липидов для организма человека. *Новые технологии*, 4, 40–42. [Berzegova, A. A. (2007). Significance of lipids for the human body. *New Technologies*, 4, 40–42. (In Russian)]
124. Simopoulos, A. P. (2002). The importance of the ratio of omega-6/omega-3 essential fatty acids. *Biomedicine and Pharmacotherapy,* 56(8), 365–379. https://doi.org/10.1016/s0753-3322(02)00253-6
125. Simopoulos, A. P. (1991). Omega-3 fatty acids in health and disease and in growth and development. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 54(3), 438–463. https://doi.org/10.1093/ajcn/54.3.438
126. Yashodhara, B. M., Umakanth, S., Pappachan, J. M., Bhat, S. K., Kamath, R., Choo, B. H. (2009). Omega-3 fatty acids: A comprehensive review of their role in health and disease. *Postgraduate Medical Journal*, 85(1000), 84–90. https://doi.org/10.1136/pgmj.2008.073338
127. EFSA (2017). Dietary Reference Values for nutrients: Summary report. *EFSA Supporting Publication,* 14(12), Article e15121E. https://doi.org/10.2903/sp.efsa.2017.e15121
128. WHO, FAO. (2004). Vitamin and Mineral Requirements in Human Nutrition. Geneva, 2004.
129. EFSA. (2006). Tolerable Upper Intake Levels for Vitamins and Minerals. Parma, 2006.
130. EFSA (2016). Dietary Reference Values for potassium. *EFSA Journal*, 14(10), Article e04592. https://doi.org/10.2903/j.efsa.2016.4592
131. EFSA (2013). Scientific Opinion on Dietary Reference Values for manganese. *EFSA Journal*, 11(11), Article 3419. https://doi.org/10.2903/j.efsa.2013.3419
132. Seth, K., Aery, N. C. (2014). Effect of boron on the contents of chlorophyll, carotenoid, phenol and soluble leaf protein in mung bean, *Vigna radiata* (L.) Wilczek. *Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section B: Biological Sciences*, 84(3), 713–719. https://doi.org/10.1007/s40011-013-0293-4
133. Singh, P., Dwivedi, P. (2019). Micronutrients zinc and boron enhance stevioside content in *Stevia rebaudiana* plants while maintaining genetic fidelity. *Industrial Crops and Products*, 140(2), Article 111646. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.1116
134. Aghighi Shahverdi, M., Omidi, H., Damalas, C. A. (2020). Foliar fertilization with micronutrients improves *Stevia rebaudiana* tolerance to salinity stress by improving root characteristics. *Brazilian Journal of Botany*, 43(1), 55–65. https://doi.org/10.1007/s40415-020-00588-6
135. Pushnik, J. C., Miller, G. W., Manwaring, J. H. (1984). The role of iron in higher plant chlorophyll biosynthesis, maintenance and chloroplast biogenesis. *Journal of Plant Nutrition*, 7(1–5), 733–758. https://doi.org/10.1080/01904168409363238
136. Lankarani, S. M. J., Karimi, J., Rezaei, A. (2024). Impact of zinc oxide nanoparticles and iron on *Stevia rebaudiana* Bertoni growth, nutrient uptake, and bioactive compounds under in vitro conditions. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture (PCTOC)*, 159(1), Article 18. https://doi.org/10.1007/s11240-024-02871-w
137. Khan, M. A., Ali, A., Mohammad, S., Ali, H., Khan, T., Mashwani, Z.-R. et al. (2020). Iron nano modulated growth and biosynthesis of steviol glycosides in *Stevia rebaudiana*. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture (PCTOC)*, 143(1), 121–130. https://doi.org/10.1007/s11240-020-01902-6
138. Schmidt, S. B., Husted, S. (2019). The biochemical properties of manganese in plants. *Plants*, 8(10), Article 381. https://doi.org/10.3390/plants8100381
139. Alejandro, S., Höller, S., Meier, B., Peiter, E. (2020). Manganese in plants: From acquisition to subcellular allocation. *Frontiers in Plant Science*, 11, Article 300. https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00300

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ	AUTHOR INFORMATION
Принадлежность к организации	**Affiliation**
Пухальский Ян Викторович — научный сотрудник, лаборатория промышленных биотехнологических инноваций, Всероссийский научно-исследовательский институт пищевых добавок 191014, Санкт-Петербург, Литейный пр., 55 E-mail: puhalskyyan@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5233-3497 * автор для контактов	**Yan V. Puhalsky**, Researcher, Laboratory of Industrial Biotechnological Innovations, All-Russian Research Institute for Food Additives 55, Liteiny pr., 191014, St. Petersburg, Russia E-mail: puhalskyyan@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5233-3497 * corresponding author
Лоскутов Святослав Игоревич — кандидат сельскохозяйственных наук, заведующий лабораторией промышленных биотехнологических инноваций, Всероссийский научно-исследовательский институт пищевых добавок 191014, Санкт-Петербург, Литейный пр., 55 E-mail: lislosk@mail.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8102-2900	**Svyatoslav I. Loskutov**, Candidate of Agricultural Sciences, Head of the Laboratory of Industrial Biotechnological Innovations, All-Russian Research Institute for Food Additives 55, Liteiny pr., 191014, St. Petersburg, Russia E-mail: lislosk@mail.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8102-2900
Воробьев Николай Иванович — кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, лаборатория биоразнообразия сельскохозяйственных микроорганизмов, Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной микробиологии, 196608, Санкт-Петербург, Пушкин-8, шоссе Подбельского, 3 E-mail: nik.ivanvorobyov@yandex.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8300-2287	**Nikolay I. Vorobyov**, Candidate of Technical Sciences, Leading Researcher, Laboratory of Biodiversity of Agricultural Microorganisms, All-Russia Research Institute for Agricultural Microbiology 3, Podbelsky highway, 196608, Pushkin 8, Saint-Petersburg, Russia E-mail: nik.ivanvorobyov@yandex.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8300-2287
Питти Хавьер Кабальеро — PhD, научный сотрудник, экспериментальная станция Серро-Пунта, Центр сельскохозяйственных инноваций, Институт сельскохозяйственных инноваций Панамы (IDIAP) Здания 161 и 162 Калле Карлос Ренато Лара Сьюдад-дель-Сабре Клейтон, Панама E-mail: javier.pitti@idiap.gob.pa ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0776-8795	**J. Caballero Pitti**, PhD, Researcher, Cerro Punta Experimental Station, Agricultural Innovation Center of Chiriquí, The Institute of Agricultural Innovation of Panama (IDIAP) Buildings 161 and 162, Calle Carlos Renato Lara, City of Knowledge Clayton, Panama E-mail: javier.pitti@idiap.gob.pa ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0776-8795
Глушаков Руслан Иванович — доктор медицинских наук, доцент, Начальник научно-исследовательского отдела (медико-биологических исследований) НИЦ, Военно-медицинская академия имени С. М. Кирова МО РФ 194044, Санкт-Петербург, ул. Академика Лебедева, 6 E-mail: glushakovruslan@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0161-5977	**Ruslan I. Glushakov**, Doctor of Medical Sciences, Docent, Head of the Research Department (Medical and Biological Research) of the Research Center, S. M. Kirov Military Medical Academy of the Ministry of Defense of the Russian Federation 6, Academician Lebedev Str., St. Petersburg, 194044, Russia E-mail: glushakovruslan@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0161-5977
Ситнов Вениамин Юрьевич — директор, Всероссийский научно-исследовательский институт пищевых добавок 191014, Санкт-Петербург, Литейный проспект, 55 E-mail: v.sitnov@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1927-1997	**Veniamin Yu. Sitnov**, Director, All-Russia Research Institute for Food Additives 55, Liteiny pr., 190000, St. Petersburg, Russia E-mail: v.sitnov@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1927-1997

Критерии авторства	Contribution
Авторы в равных долях имеют отношение к написанию рукописи и одинаково несут ответственность за плагиат.	Authors equally relevant to the writing of the manuscript, and equally responsible for plagiarism.
Конфликт интересов	**Conflict of interest**
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.	The authors declare no conflict of interest.

DOI: https://doi.org/10.21323/2618-9771-2026-9-2-329-336

Поступила 23.05.2026
Поступила после рецензирования 15.06.2026
Принята в печать 17.06.2026
© Купаева Н. В., Чернуха И. М., Трубина М. В., Нестерова М. Д., Кузина М. П., 2026

https://www.fsjour.com/jour
Научная статья
Открытый доступ

ОПТИМИЗАЦИЯ УСЛОВИЙ ФЕРМЕНТАТИВНОЙ ЭКСТРАКЦИИ ФЕНОЛЬНЫХ АНТИОКСИДАНТОВ ИЗ ПШЕНИЧНЫХ ОТРУБЕЙ

Купаева Н. В.[1]*, Чернуха И. М.[1], Трубина М. В.[1], Нестерова М. Д.[1], Кузина М. П.[1]

Федеральный научный центр пищевых систем им. В. М. Горбатова, Москва, Россия

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *фенольные соединения, растительные антиоксиданты, вторичные продукты переработки, механизмы HAT и SET, функциональные ингредиенты*

АННОТАЦИЯ

Пшеничные отруби (ПО) являются перспективным источником связанных фенольных соединений (ФС), обладающих антиоксидантными свойствами. Однако значительная часть ФС ассоциирована с полисахаридной матрицей клеточной стенки и характеризуется ограниченной биодоступностью. Целью работы являлась оптимизация условий ферментативной экстракции антиоксидантов (АО) из пшеничных отрубей с использованием комплекса α-амилазы, β-глюканазы и ксиланазы. На первом этапе исследовали влияние концентрации α-амилазы и β-глюканазы в диапазоне от 0,001 % до 1 % при фиксированной концентрации ксиланазы 2 %. На втором этапе оценивали влияние продолжительности экстракции в диапазоне от 1 до 9 ч. Антиоксидантный потенциал (АОП) экстрактов определяли путем измерения общей антиоксидантной емкости (ОАЕ) методами FRAP, DPPH и ORAC, а также общего количества фенольных соединений (ОКФС) и флавоноидов (ОКФ). Установлено, что ферментативная обработка способствовала увеличению ОАЕ и содержания фенольных соединений по сравнению с контрольным образцом без добавления ферментов. Повышение концентрации ферментов от 0,001 % до 1 % сопровождалось увеличением $ОАЕ_{FRAP}$ на 56,7 % ($p < 0,05$), $ОАЕ_{ORAC}$ — более чем в 2 раза ($p < 0,05$), а содержание фенольных соединений возрастало до 13,32 ± 0,23 мкмоль-экв. G/г отрубей. Увеличение продолжительности экстракции приводило к дальнейшему росту АОП экстрактов, при этом максимальные значения $ОАЕ_{ORAC}$ и ОКФС были достигнуты при 7–8 ч обработки и составляли 5,31 ± 0,18 мкмоль-экв. Q/г и 14,19 ± 0,18 мкмоль-экв. G / г отрубей ($p < 0,05$), соответственно. Полученные результаты свидетельствуют о перспективности ферментативной обработки пшеничных отрубей для получения экстрактов с повышенным антиоксидантным потенциалом, которые могут рассматриваться в качестве источников природных антиоксидантов и функциональных ингредиентов для пищевой промышленности.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Исследование проводилось в рамках государственного задания ФГБНУ «ФНЦ пищевых систем им. В. М. Горбатова» РАН FGUS-2026-0003.

БЛАГОДАРНОСТИ: Авторы выражают благодарность за предоставление образцов отделу безопасности и качества зерна и зернопродукции Всероссийскому научно-исследовательскому института зерна и продуктов его переработки — филиал ФГБНУ «ФНЦ пищевых систем им. В. М. Горбатова» РАН.

Received 23.05.2026
Accepted in revised 15.06.2026
Accepted for publication 17.06.2026
© Kupaeva N. V., Chernukha I. M., Trubina M. V., Nesterova M. D., Kuzina M. P., 2026

Available online at https://www.fsjour.com/jour
Original scientific article
Open access

OPTIMIZATION OF ENZYMATIC EXTRACTION CONDITIONS FOR PHENOLIC ANTIOXIDANTS FROM WHEAT BRAN

Nadezhda V. Kupaeva[1]*, Irina M. Chernukha[1], Maria V. Trubina[1], Maria D. Nesterova[1], Marina P. Kuzina[1]

V. M. Gorbatov Federal Research Center for Food Systems of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

KEYWORDS: *phenolic compounds, plant antioxidants, secondary raw materials, HAT and SET mechanisms, functional ingredients*

ABSTRACT

Wheat bran (WB) is a promising source of bound phenolic compounds (PC) with antioxidant properties. However, a significant portion of PC is bound to the cell wall polysaccharide matrix and is characterized by limited bioavailability. The aim of this study was to optimize the conditions for the enzymatic extraction of antioxidants (AO) from wheat bran using a complex of α-amylase, β-glucanase, and xylanase. In the first stage, the effect of α-amylase and β-glucanase concentrations ranging from 0.001 % to 1 % was investigated at a fixed xylanase concentration of 2 %. In the second stage, the effect of extraction duration in the range from 1 to 9 hours was evaluated. The antioxidant potential (AOP) of the extracts was determined by measuring total antioxidant capacity (TAC) using FRAP, DPPH, and ORAC methods, as well as the total phenolic compounds (TPC) and total flavonoid compounds (TFC). Enzymatic treatment was found to increase TAC and phenolic compound content compared to the control sample obtained without added enzymes. Increasing enzyme concentration from 0.001 % to 1 % was accompanied by a 56.7 % ($p < 0.05$) increase in TAC_{FRAP} and more than twofold ($p < 0.05$) increase in TAC_{ORAC}, while the content of phenolic compounds increased to 13.32 ± 0.23 μmol-eq. G/g of bran. Increasing extraction duration led to a further increase in the AOP of the extracts, with the maximum values of TAC_{ORAC} and TPC reached upon 7–8 hours of treatment and amounted to 5.31 ± 0.18 μmol-eq. Q/g and 14.19 ± 0.18 μmol-eq. G/g of bran ($p < 0.05$), respectively. The results obtained indicate the potential of enzymatic treatment of wheat bran for obtaining extracts with increased antioxidant potential, which can be considered sources of natural antioxidants and functional ingredients for the food industry.

FUNDING: The article was published as part of the research topic No. FGUS-2026-0003 of the state assignment of the V. M. Gorbatov Federal Research Center for Food Systems of RAS.

ACKNOWLEDGMENTS: The authors express their gratitude to the Department of Grain and Grain Products Safety and Quality of the All-Russian Research Institute of Grain and Grain Products Processing — a branch of the V. M. Gorbatov Federal Research Center for Food Systems of the Russian Academy of Sciences, for providing the wheat bran samples used in this study.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: **Купаева, Н.В., Чернуха И. М., Трубина М. В., Нестерова М. Д., Кузина М. П.** (2026). Оптимизация условий ферментативной экстракции фенольных антиоксидантов из пшеничных отрубей. *Пищевые системы*, 9(2), 329–336. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2026-9-2-329-336

FOR CITATION: **Kupaeva, N.V., Chernukha, I.M., Trubina, M.V., Nesterova, M.D., Kuzina, M.P.** (2026). Optimization of enzymatic extraction conditions for phenolic antioxidants from wheat bran. *Food Systems,* 9(2), 329–336. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2026-9-2-329-336

1. Введение

В настоящее время природные антиоксиданты (АО) растительного происхождения рассматриваются как перспективный функциональный ингредиент для пищевой промышленности благодаря их способности предотвращать окислительное повреждение биомолекул [1–5]. Антиоксиданты используют как в качестве функциональных ингредиентов при разработке продуктов с биологической активность [6–8], так и в качестве антиокислителей для продления сроков годности и сохранности пищевой ценности продуктов питания [1–3].

В последние годы особое внимание уделяется поиску новых источников растительных АО [2–5], что связано с их биодоступности [5], разнообразию, комплексности воздействия, многофункциональности и безопасности для организма [2–4] по сравнению с синтетическими аналогами. Перспективным направлением является использование вторичных продуктов переработки растительного сырья, что позволяет одновременно решать задачи ресурсосбережения и получения биологически активных соединений (БАС) с высокой добавленной стоимостью. Ежегодно в ходе деятельности аграрно-промышленного сектора производится более 630 млн тонн побочных продуктов, из которых 220–230 млн тонн приходится на отходы растительного происхождения [9]. Одним из перспективных вторичных продуктов являются пшеничные отруби (ПО), образующиеся при переработке зерна. Известно, что выход отрубей при помоле пшеницы составляет 13–19 % от массы перерабатываемого зерна в зависимости от способа помола [10] По данным Росстата, в 2023 г. в России было произведено 9,1 млн т пшеничной и пшенично-ржаной муки [11]; с учетом выхода муки при переработке зерна и доли отрубей в массе зерновки потенциальный объем образования ПО можно оценить на уровне 1,6–2,3 млн т в год

Пшеничные отруби представляют собой наружные зерновые слои, включающие плодовые и семенные оболочки, а также алейроновый слой. ПО характеризуются богатым химическим составом и содержат около 40–50 % пищевых волокон (целлюлозы, ксиланов и лигнина), 16 % белковых соединений, минералов (магний, фосфор, железо и др.), витаминов С, Е и группы В [12,13]. Однако наибольший интерес вызывает многообразие фенольных соединений (ФС), среди которых доминирует феруловая кислота (до 70 % от общего количества ФС) [14], а также лигнаны, алкилрезорцинолы, ванильная, кофейная и п-кумаровая кислоты, флавоноиды и другие соединения, обладающие антиоксидантными свойствами [15]. Так, арабиноксиланы и ксилоолигосахариды, связанные с феруловой кислотой, проявляют иммуномодулирующие [16] и пребиотические свойства [17,18]. Более того, ПО проявляют антиоксидантные свойства, обеспечивая защиту клеток от СР и окислительного стресса [19], а также пролонгированное противовоспалительное воздействие [20,21]. В работе Kobayashi et al [22] была показана способность экстрактов пшеничных отрубей к стимуляции синтеза коллагена и подавлению активности эластазы, гиалуронидазы и коллагеназы, что может быть использовано в косметической промышленности для создания функциональных ингредиентов.

Известно, что антиоксидантные свойства ПО в значительной степени определяются содержанием ФС и особенностями их локализации в растительной матрице. Значительная часть ФС отрубей находится в связанном состоянии и ассоциирована с полисахаридами клеточной стенки, преимущественно с арабиноксиланами, посредством сложноэфирных и ковалентных связей [23,24]. Пшеничные отруби содержат от 35 % до 50 % некрахмальных полисахаридов, при этом 60–70 % этого объёма занимают арабиноксиланы, присоединяющие фенольные соединения в боковые цепи и удерживающие их в связанном состоянии [25]. Такое структурное сопряжение снижает биодоступность ФС и ограничивает проявление их биологических свойств. В связи с этим для эффективного использования антиоксидантного потенциала (АОП) пшеничных отрубей необходимо высвобождение связанных ФС и перевод их в доступную форму, что требует подбора методов экстракции и оптимизации условий процесса.

Для извлечения АО из растительного сырья применяют различные методы экстракции, включая мацерацию, ультразвуковую (УЗ), микроволновую, ферментативную и др. Выбранный способ экстракции оказывает существенное влияние как на количественный и качественный состав экстракта, так и на его антиоксидантный потенциал [26]. В ряде исследований показано, что ферментативная обработка ПО является одним из наиболее эффективных подходов к высвобождению связанных ФС за счет разрушения полисахаридной матрицы клеточных стенок [27,28]. Использование ферментативных препаратов, содержащих ксиланазу, β-глюканазу и α-амилазу, обеспечивает гидролиз арабиноксиланов, β-глюканов и крахмальных компонентов, повышая доступность ФС и способствуя увеличению АОП экстрактов [29]. В работе Ye et al. [30] использование ксиланазы при экстракции ПО способствовало увеличению общего содержания ФС на 34,5 %, однако не привадило к росту других параметров АОП. В исследовании Bautista-Expósito et al. [31] среди опробованных 13 ферментных комплексов наиболее высокие выход ФС и показатели АОП были характерны для экстракта, полученного с использованием ферментного препарата, включающего β-глюконазу, целлюлазы, α-амилазу, ксиланазу и пентозаназу, который способствовал эффективному разрушения полисахаридной матрицы ПО и высвобождению ФС. Ксиланаза способствует гидролизу арабиноксиланов клеточных стенок [32], β-глюканаза — расщеплению β-глюканов и деструкции полисахалиридных структур [33], что приводит к высвобождению связанных фенольных соединений [29]; α-амилаза — расщеплению крахмальных компонентов (снижение вязкости) [32]. В исследовании Ferri et al. было показано, что эффективность ферментативной экстракции определяется не только составом ферментного комплекса, но и соотношением ферментов, температурой и продолжительностью процесса [34]. Однако данные о влиянии указанных параметров на выход ФС и показатели АОП экстрактов пшеничных отрубей остаются ограниченными и в ряде случаев противоречивыми. Кроме того, недостаточно изучено влияние комбинированного применения ферментных препаратов на эффективность разрушения полисахаридной матрицы и высвобождение связанных АО.

Таким образом, целью данной работы являлась оптимизация условий ферментативной экстракции антиоксидантов из пшеничных отрубей для получения экстрактов, обладающих высоким антиоксидантным потенциалом.

2. Объекты и методы

Объектом исследования являлись пшеничные отруби из зерна 1 класса, собранного в 2023 году в Тульской области, Россия. Хранение образцов осуществлялось при температуре 4 ± 2 °С в плотно закрытой емкости. Образцы для исследования были предоставлены Отделом безопасности и качества зерна и зернопродукции Всероссийского научно-исследовательского института зерна и продуктов его переработки — филиал ФГБНУ «ФНЦ пищевых систем им. В. М. Горбатова» РАН.

2.1. Реактивы

При проведении экспериментальных работ были использованы реактивы:

- ксиланаза (ферментативная активность: 10000 ед/г), β-глюканаза (ферментативная активность: 10000 ед/мл) — Биопрепарат (Россия);
- α-амилаза из *Aspergillus oryzae* (ферментативная активность: 30000 ед/г, ⩾ 95 %) — Sigma (Switzerland);
- 2,2-дифенил-1-пикрилгидразил (DPPH, ⩾90 %) — Santa Cruz Biotechnology (USA);
- 2,4,6-Три(2-пиридил)-1,3,5-пиридин (TPTZ, чистота ⩾96 %) — BLDpharm (China);
- железа хлорид (III) (⩾ 97 %), Фолин-Чокальтеу, натрия карбонат (⩾99,5 %), натрия ацетат безводный (⩾99 %) — PanReac AppliChem (Spain);
- кверцетин (⩾95 %, India), флуоресцеина натрия (⩾97,5 %, USA), галловая кислота (⩾98 %, China), 2,2′-азобис (2-дигидрохлорид метилпропионамидина (AAPH, чистота ⩾97 %, USA) — Sigma-aldrich;
- гексагидрат хлорида алюминия (Pharmpur) фирма ScharLab (Spain);
- глюкоза — AppliChem GmbH-An ITW Company (Germany);
- фенол (⩾99 %) — Диаэм (Россия);
- серная кислота (⩾98 %) — Acros Organics (Belgium).

2.2. Подбор условий ферментативной экстракции пшеничных отрубей

Подбор условий ферментативной экстракции отрубей пшеничных проводили в 2 этапа: варьирование концентрации α-амилазы из *Aspergillus oryzae* (активность 30000 ед/г) и β-глюканазы (активность 10000 ед/мл) в диапазоне от 0,001 % до 1 % от массы отрубей с десятикратным шагом и определение оптимального времени экстракции (1–9 ч, с шагом в один час).

Вне зависимости от этапа подбора условий экстракция имела общий алгоритм: ПО смешивали с дистиллированной водой в соотношении 1:5 (г/мл) и добавляли ферменты (% от массы ПО). Смесь гомогенизировали с использованием ручного гомогенизатора S10

(Stegler, Китай) при 8000 об/мин в течение 2 мин и инкубировали при 60 ± 2 °C и постоянном перемешивании при 500 об/мин на шейкере Immunochem-2200 (High Technology Inc., США). Экстракцию проводили без дополнительной корректировки pH. Температура процесса была выбрана с учетом диапазона активности используемых ферментов и необходимости минимизации термической деградации ФС. Полученную смесь разделяли с помощью центрифуги (LISTON C2204, Россия) в течение 10 мин при 3600 об/мин, отбирали надосадочную жидкость и хранили при минус 40 °C. Перед проведением исследований образцы размораживали и повторно центрифугировали при 10000 об/мин в течение 10 мин при 4 °C.

Подбор концентрации ферментов для экстракции пшеничных отрубей осуществляли путем варьирования концентрации α-амилазы и β-глюканазы в диапазоне концентраций от 0,001 % до 1 % от массы отрубей с десятикратным шагом. Концентрация ксиланазы составляла 2 % от массы ПО. Параметры были выбраны на основании литературных данных и технологически целесообразных концентраций ферментных препаратов. В контрольный образец не добавляли ферменты. Длительность инкубации составляла 3 часа при условиях, описанных выше. Обозначения образцов с разной концентрацией ферментов представлены в Таблице 1.

Таблица 1. **Обозначения образцов при подборе концентрации ферментов для экстракции**

Table 1. **Designations of the samples upon selection of an enzyme concentration for extraction**

№ образца	Концентрация ферментов
Контроль	без ферментов
1	2 % ксиланазы; 0.001 % α-амилазы; 0.001 % β-глюканазы
2	2 % ксиланазы; 0.01 % α-амилазы; 0.01 % β-глюканазы
3	2 % ксиланазы; 0.1 % α-амилазы; 0.1 % β-глюканазы
4	2 % ксиланазы; 1 % α-амилазы; 1 % β-глюканазы

Для каждого образца определяли параметры АОП: общую антиоксидантную емкость (ОАЕ) методами FRAP, ORAC и DPPH для учета вклада антиоксидантов, действующих по разным механизмам, измеряли общее количество фенольных соединение (ОКФС) и флавоноидов (ОКФ).

Продолжительность экстракции варьировали в диапазоне от 1 до 9 ч с шагом 1 час для оценки динамики высвобождения АО и определения оптимального времени процесса. Концентрации ферментов составляли 2 % ксиланазы, 1 % α-амилазы; % β-глюканазы. Экстракцию проводили в условиях, описанных выше. В полученных образцах определяли аналогичные параметры АОП.

2.3. Методы определения параметров антиоксидантного потенциала

Общую антиоксидантную емкость методом свободного радикала DPPH ($ОАЕ_{DPPH}$) определяли на спектрофотометре СФ-2000 (Спектр, Россия) в соответствии с методикой [35]. Стоковый 1 мМ этанольный раствор радикала DPPH готовили в посуде из тёмного стекла и настаивали в темноте при температуре 22 ± 2 °C в течение 12 ч. Рабочий 100 мкМ раствор DPPH с оптической плотностью не менее 1,0 оптической единицы готовили непосредственно перед измерением. Для определения $ОАЕ_{DPPH}$ в стеклянные пробирки вносили 1,52 мл рабочего раствора DPPH и 80 мкл образца, в качестве холостой пробы использовали 96 % этиловый спирт. Для построения калибровочного графика использовали кверцетин (Q) в концентрациях 100–250 мкМ. Полученную реакционную смесь встряхивали и инкубировали в темноте при 22 ± 2 °C в течение 30 мин. Измерения оптической плотности проводили при длине волны 517 нм. Значения $ОАЕ_{DPPH}$ рассчитывали по калибровочной кривой кверцетина (R^2 > 0,99) с использованием уравнения 1 и выражали в мкмоль-экв. Q/г отрубей.

$$ОАЕ_{DPPH} = \frac{\frac{D_k - D_o}{D_k} \times 100\% - 4{,}6904}{0{,}3081}, \quad (1)$$

где D_o — оптическая плотность образца; D_k — оптическая плотность контрольной пробы; −4,6904 (*b*) и 0,3091 (*a*) — коэффициенты из линейного уравнения калибровочного графика.

Определение ОАЕ методом Ferric Reducing Antioxidant Power ($ОАЕ_{FRAP}$) проводили на спектрофотометре СФ-2000 в соответствии с методикой [35]. Реактив FRAP готовили путём смешивания 0,3 М ацетатного буфера (pH 3,6), 10 мМ раствора TPTZ, растворённого в 40 мМ соляной кислоте, и водного раствора хлорида железа (III) в соотношении 10:1:1, соответственно. Для определения $ОАЕ_{FRAP}$ в стеклянные пробирки вносили 1,45 мл реактива FRAP и 50 мкл образца / дистиллированной воды (холостая проба). Полученную реакционную смесь встряхивали и инкубировали в темноте при 37 ± 2 °C в течение 30 мин. Измерения проводили при длине волны 594 нм. Значения $ОАЕ_{FRAP}$ были рассчитаны по калибровочной кривой кверцетина (140–300 мкМ, R^2 > 0,99) и выражали в мкмоль-экв. Q/г отрубей.

Определение ОАЕ методом Oxygen Radical Absorbance Capacity ($ОАЕ_{ORAC}$) проводили на флуорометре-люминометре Fluoroskan Ascent FL (TermoLabsystems, Finland) с использованием черных 96-луночных планшетов в соответствии с методикой [36]. В рабочие лунки планшета вносили по 30 мкл образца или раствора кверцетина (1–14 мкМ) для построения градуировочных графиков, а в качестве холостой пробы вносили 5 мМ фосфатный буфер (pH 7,4). Далее в каждую лунку добавляли 200 мкл 0,5 мкМ флуоресцеина натрия. Планшет закрывали защитной пленкой и инкубировали при 37 ± 2 °C в течение 30 мин. По истечении инкубации в лунки вносили 30 мкл 153 мкМ ААРН и измеряли интенсивность флуоресценции. Измерение $ОАЕ_{ORAC}$ проводили при при 37 ± 2 °C в течение 60 мин (интервал считывания 5 мин) при длинах волн возбуждения и эмиссии 485 нм и 535 нм, соответственно. Значение $ОАЕ_{ORAC}$ были рассчитаны с использованием калибровочной кривой кверцетина (1–14 мкМ, R^2 > 0,99) и выражали в мкмоль-экв. Q/г отрубей.

Общее количество фенольных соединений в экстрактах измеряли на спектрофотометре СФ-2000 методом Фолина-Чокальтеу в соответствии с методикой [37]. Для определения ОКФС в стеклянные пробирки вносили 125 мкл образца или дистиллированной воды (холостая проба), 125 мкл реактива Фолина-Чокальтеу и 1 мл 7,5 % раствора Na_2CO_3. Полученную реакционную смесь инкубировали при температуре 22 ± 2 °C в течение 20 мин, затем измеряли оптическую плотность при 765 нм. Значения ОКФС были рассчитаны по калибровочной кривой галловой кислоты (G) (R^2 > 0,99) и выражали в мкмоль-экв. G/г отрубей.

Общее количество флавоноидов в экстрактах отрубей измеряли на спектрофотометре СФ-2000 (Спектр, Россия) в соответствии с методикой [38]. Для определения ОКФ в стеклянные пробирки вносили 125 мкл образца, 375 мкл 96 % этилового спирта, 25 мкл 3 % $AlCl_3$, 25 мкл 1М CH_3COONa, и 700 мкл дистиллированной воды. Для холостой пробы вместо хлорида алюминия добавляли дистиллированную воду. Полученную реакционную смесь инкубировали при температуре 22 ± 2 °C в течение 30 мин. Оптическую плотность измеряли при 445 нм. Значения ОКФ были рассчитаны по калибровочной кривой кверцетина (50–500 мкМ, R^2 > 0,99) и выражены в мкмоль-экв. Q/г отрубей.

2.4. Статистический анализ

Все измерения выполняли в четырех повторах. Статистический анализ экспериментальных данных проводили с использованием программы STATISTICA 10, результаты представляли в виде среднего значения и стандартного отклонения «Mean ± SD». Для определения достоверности различий средних величин использовали дисперсионный анализ ANOVA с применением критерия Тьюки, для зависимых переменных использовали критерий Фридмана. Вероятность 0,05 была выбрана в качестве значимого уровня. Для построения графиков использовали программное обеспечение GraphPad Prism 8.0.2.

3. Результаты и обсуждение

Результаты измерения параметров АОП экстрактов пшеничных отрубей, полученных методом ферментативной экстракции с разными концентрациями ферментов представлены в Таблице 2 и на Рисунке 1.

Варьирование концентрации ферментов оказывало выраженное влияние на параметры АОП экстрактов пшеничных отрубей. Для всех опытных образцов значения ОКФС и ОАЕ в независимости от метода были выше чем аналогичные показатели контрольного образца, полученного без добавления ферментов (p < 0,05), что подтверждает эффективность ферментативной деструкции полисахаридной матрицы ПО и высвобождение связанных АО.

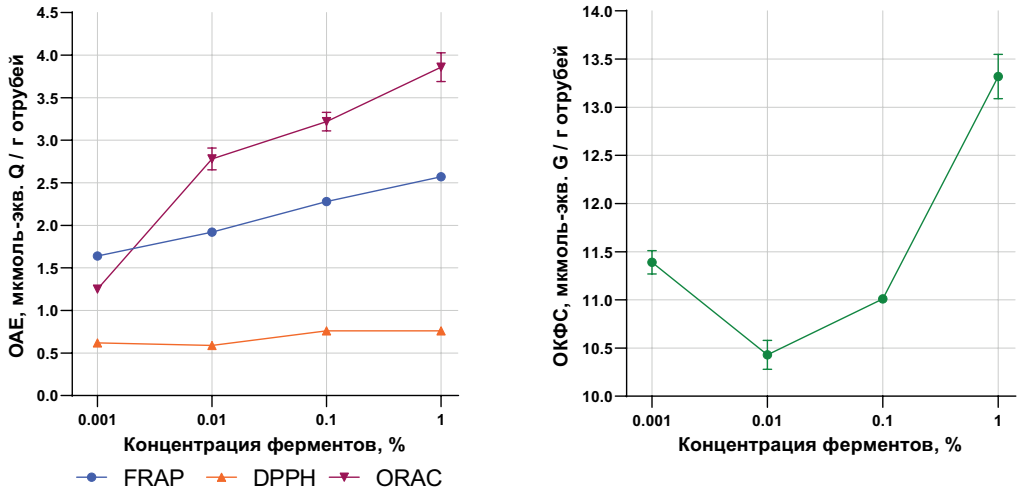
Увеличение концентрации α-амилазы и β-глюканазы от 0,001 % до 1 % сопровождалось статистически значимым практически дозозависимым повышением $ОАЕ_{FRAP}$ и $ОАЕ_{ORAC}$, в то время как значения $ОАЕ_{DPPH}$ менялись значительно слабее. Наиболее выраженные изменения наблюдались для $ОАЕ_{ORAC}$, величина которой возрастала с 2,81 ± 0,18 до 3,86 ± 0,17 мкмоль-экв. Q/г отрубей, что свидетельствует о возрастании способности экстрактов к нейтрализации пероксильных радикалов.

Таблица 2. **Результаты определения параметров АОП экстрактов пшеничных отрубей, полученных с использованием разной концентрации ферментов**

Table 2. **Results of the determination of the AOP parameters of the wheat bran extracts obtained using different concentrations of enzymes**

№ образца	ОАЕ, мкмоль-экв. Q/г отрубей			ОКФС, мкмоль-экв. G/г отрубей	ОКФ, мкмоль-экв. Q/г отрубей
	OAE_{FRAP}	OAE_{DPPH}	OAE_{ORAC}		
Контроль	$0,85 \pm 0,01^{a, A}$	$0,31 \pm 0,01^{a, B}$	$2,32 \pm 0,22^{a, C}$	$8,09 \pm 0,15^{a}$	$0,05 \pm 0,00^{a}$
1	$1,64 \pm 0,03^{b, A}$	$0,62 \pm 0,01^{b, B}$	$2,81 \pm 0,18^{b, C}$	$11,39 \pm 0,12^{b}$	$0,06 \pm 0,01^{a}$
2	$1,92 \pm 0,02^{c, A}$	$0,59 \pm 0,01^{c, B}$	$2,78 \pm 0,13^{b, c, C}$	$10,43 \pm 0,15^{c}$	нпо
3	$2,28 \pm 0,02^{d, A}$	$0,76 \pm 0,01^{d, B}$	$3,22 \pm 0,11^{d, C}$	$11,01 \pm 0,01^{d}$	нпо
4	$2,57 \pm 0,04^{e, A}$	$0,76 \pm 0,01^{d, B}$	$3,86 \pm 0,17^{e, C}$	$13,32 \pm 0,23^{e}$	нпо
p-value (контроль-4)	0,003	0,004	0,004	0,003	—
p-value (1–4)	0,007	0,011	0,011	0,018	—

Примечание. Каждое значение выражено как среднее значение ± стандартное отклонение ($n = 4$). нпо — ниже предела обнаружения. Средние значения, обозначенные разными строчными буквами (a, b, c, d, e) в столбце, существенно различались ANOVA, критерий Тьюки ($p < 0,05$). Средние значения, обозначенные разными заглавными буквами в строке (A, B, C), существенно различались ANOVA, критерий Тьюки ($p < 0,05$). p-value — достоверная разница, критерий Фридмана, ($p < 0.05$).



а б

Рисунок 1. **Зависимость параметров АОП экстрактов пшеничных отрубей от концентрации ферментов: где а — ОАЕ, определенная методами FRAP, DPPH и ORAC; б — общее количество фенольных соединений. По оси X представлена концентрация α-амилазы и β-глюканазы, %, в логарифмической шкале**

Figure 1. **Dependence of the AOP parameters of the wheat bran extracts on the enzyme concentration: a — TAC determined by the FRAP, DPPH and ORAC methods; б — total phenolic compounds. The x-axis represents the concentration of α-amylase and β-glucanase (%) on the logarithmic scale**

Аналогичная тенденция была характерна для OAE_{FRAP}: показатель увеличивался от 1,64 ± 0,03 до 2,57 ± 0,04 мкмоль-экв. Q/г отрубей. При этом значения OAE_{DPPH} изменялись менее выраженно и находились в диапазоне 0,59–0,76 мкмоль-экв. Q/г отрубей, что ниже OAE_{FRAP} и OAE_{ORAC} более чем на 50 % ($p < 0.05$). Максимальное увеличение значений ОАЕ при варьировании концентрации ферментов от 0,001 % до 1 % составило: для OAE_{DPPH} 22,6 % ($p = 0.0112$), OAE_{FRAP} 56,7 % ($p = 0.0074$), OAE_{ORAC} 208,8 % ($p = 0.0112$). Полученные данные указывают на изменение состава экстрактов при увеличении концентрации ферментов и преимущественное накопление соединений, проявляющих антиоксидантные свойства по механизмам переноса атома водорода (HAT) и переноса электрона (SET).

Изменение общего количества фенольных соединений носило нелинейный характер (Рисунок 1б) и характеризовалось резким снижением с последующим ростом, однако все значения были выше показателя контрольного образца ($p < 0,05$). Использование ферментов в концентрациях 0,01 % и 0,1 % приводило к снижению ОКФС на 8,4 % ($p < 0,05$) и 3,3 % ($p < 0,05$), соответственно, в сравнении с образцом № 1 (0,001 % ферментов). Минимальное значение ОКФС было отмечено при концентрации ферментов 0,01 % и составило 10,43 ± 0,15 мкмоль-экв. G/г отрубей. Максимальное значение ОКФС наблюдалось для экстракта, полученного при использовании 1 % α-амилазы и β-глюканазы и составляло 13,32 ± 0,23 мкмоль-экв. G/г отрубей, что было выше контроля на 64,6 % ($p < 0,05$).

Общее количество флавоноидов в исследуемых образцах находилось ниже предела обнаружения за исключением контрольного образца и опытного, полученного при концентрации ферментов 0,001 % (образец 1). Полученные значения находились на нижней границе рабочего диапазона используемого метода. Снижение определяемого содержания флавоноидов при увеличении концентрации ферментов может быть связано с изменением состава фенольной фракции в процессе ферментативного гидролиза, а также возможным взаимодействием флавоноидов с ферментами. В литературе описана способность флавоноидов связываться с α-амилазой и α-глюкозидазой посредством водородных связей и гидрофобных взаимодействий, что может влиять на их доступность для аналитического определения [39].

Стоит отметить несоответствие между динамикой ОКФС и показателями ОАЕ, особенно при низких концентрациях ферментов, что свидетельствует о вкладе в АОП экстрактов не только свободных ФС. Так, при минимальной концентрации ферментов (0,001 %) в сравнении с контрольным образцом наблюдалось существенное увеличение OAE_{DPPH} и OAE_{FRAP} на 100 % ($p < 0,05$) и 93 % ($p < 0,05$), соответственно, при менее выраженном росте OAE_{ORAC} (21 %, $p < 0,05$). Вероятно, на начальных этапах ферментативного гидролиза происходило преимущественное высвобождение водорастворимых фрагментов полисахаридов и белково-полисахаридных комплексов, обладающих собственным АОП. В литературе сообщается, что полисахариды пшеничных отрубей способны проявлять антиоксидантные свойства в особенности в нейтрализации радикалов DPPH и ABTS, а также гидроксильных и супероксидных радикалов, что связывают с наличием гидроксильных групп и ассоциированных фенольных компонентов [40].

Кроме того, следует учитывать ограничения метода Фолина-Чокальтеу, который не является строго специфичными только к ФС. В работе Berker et al. [41] сообщалось, что некоторые восстановители, такие как аминокислоты, могут вносить вклад в сигнал реактива Фолина-Чокальтеу, что приводит к завышению результата. Так, относительно высокие значения ОКФС при минимальной концентрации ферментов могли быть частично обусловлены присутствием не фенольных восстановителей в экстракте.

При дальнейшем увеличении концентрации ферментов до 0,1% и 1% наблюдалось более выраженное повышение OAE_{ORAC} на 16% и 20% ($p < 0,05$), соответственно, на фоне повторного роста ОКФС на 5,6% и на 21% ($p < 0,05$), соответственно. Данное наблюдение может свидетельствовать об усилении деструкции клеточной стенки и высвобождении связанных фенольных соединений, прежде всего производных феруловой кислоты, ассоциированных с арабиноксиланами пшеничных отрубей. Согласно литературным данным, связанные ФС пшеничных отрубей обладают более высоким АОП по сравнению со свободными фракциями, особенно в реакциях нейтрализации пероксильных радикалов [42]. Вероятно, именно накопление таких соединений обусловило наиболее выраженный рост показателя OAE_{ORAC} при максимальной концентрации ферментов.

Таким образом, были определены концентрации ферментов (1% α-амилазы и β-глюканазы в сочетании с 2% ксиланазы), обеспечивающие получение экстракта ПО, характеризующегося максимальными значениями ОКФС и ОАЕ, определенной методами FRAP, ORAC и DPPH. Полученные данные позволяют предположить, что увеличение концентрации α-амилазы и β-глюканазы обеспечивало более эффективное высвобождение связанных фенольных соединений, прежде всего производных феруловой кислоты, ассоциированных с арабиноксиланами клеточной стенки.

Дальнейший подбор условий экстрагирования АО из пшеничных отрубей включал варьирование продолжительности экстракции от 1 до 9 ч. Результаты определения параметров АОП экстрактов, полученных при разной длительности экстракции представлены в Таблице 3 и на Рисунке 2. Увеличение продолжительности ферментативной экстракции от 1 до 9 ч оказывало выраженное влияние на параметры АОП экстрактов пшеничных отрубей. Для большинства исследуемых показателей наблюдалась тенденция к увеличению значений по мере роста времени инкубации, однако характер изменений зависел от используемого метода оценки АОП.

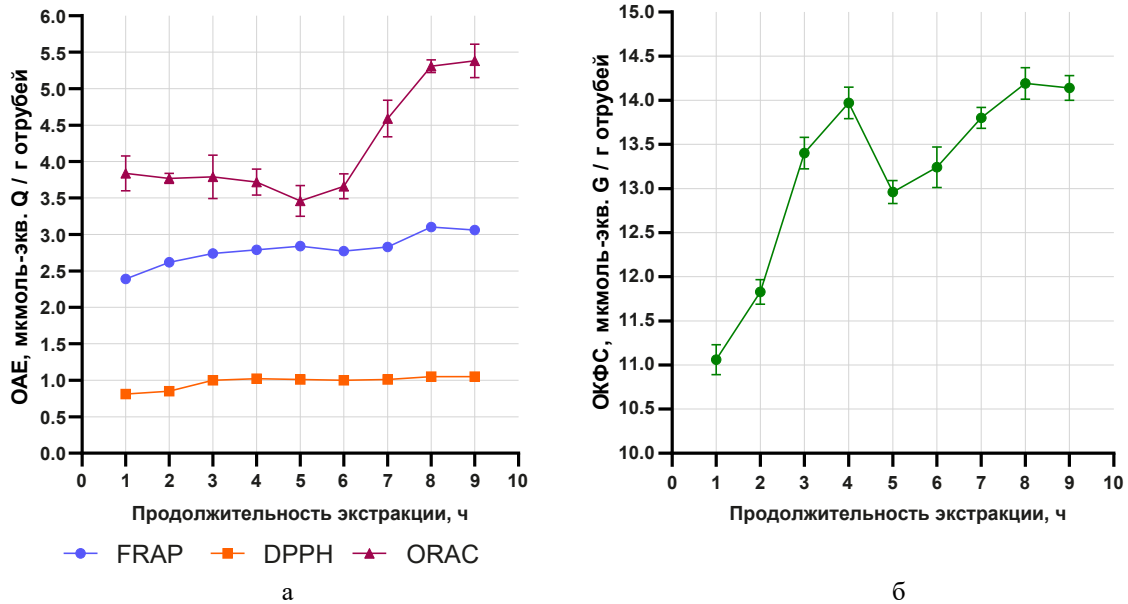
Наиболее равномерное увеличение значений было характерно для OAE_{FRAP}, где показатель плавно возрастал при увеличении времени

Таблица 3. **Результаты определения параметров АОП экстрактов пшеничных отрубей, полученных при разной длительности экстракции**

Table 3. **Results of the determination of the AOP parameters of the wheat bran extracts obtained upon different duration of extraction**

Время, часы	ОАЕ, мкмоль-экв. Q/г отрубей			ОКФС, мкмоль-экв. G/г отрубей	ОКФ, мкмоль-экв. Q/г отрубей
	OAE_{FRAP}	OAE_{DPPH}	OAE_{ORAC}		
1	$2,39 \pm 0,01^{a, A}$	$0,80 \pm 0,02^{a, B}$	$3,84 \pm 0,24^{a, C}$	$11,06 \pm 0,17^{a}$	нпо
2	$2,62 \pm 0,04^{b, A}$	$0,85 \pm 0,01^{b, B}$	$3,77 \pm 0,07^{a, C}$	$11,83 \pm 0,14^{b}$	нпо
3	$2,74 \pm 0,02^{c, A}$	$1,00 \pm 0,01^{c, B}$	$3,86 \pm 0,17^{a, C}$	$13,40 \pm 0,18^{c}$	нпо
4	$2,79 \pm 0,03^{c, d, A}$	$1,02 \pm 0,01^{c, B}$	$3,72 \pm 0,18^{a, C}$	$13,97 \pm 0,18^{d}$	нпо
5	$2,84 \pm 0,04^{d, A}$	$1,01 \pm 0,001^{c, B}$	$3,46 \pm 0,21^{a, C}$	$12,96 \pm 0,13^{e}$	нпо
6	$2,77 \pm 0,03^{c, d, A}$	$1,00 \pm 0,01^{c, B}$	$3,52 \pm 0,31^{a, C}$	$13,24 \pm 0,23^{c, e}$	нпо
7	$2,83 \pm 0,05^{d, A}$	$1,01 \pm 0,001^{c, B}$	$4,59 \pm 0,25^{b, C}$	$13,80 \pm 0,12^{c, d}$	нпо
8	$3,10 \pm 0,04^{e, A}$	$1,05 \pm 0,01^{d, B}$	$5,32 \pm 0,09^{c, C}$	$14,19 \pm 0,18^{d}$	нпо
9	$3,06 \pm 0,03^{e, A}$	$1,05 \pm 0,01^{d, B}$	$5,34 \pm 0,24^{c, C}$	$14,14 \pm 0,144^{d}$	нпо
p-value (1–9)	0,0001	0,0002	0,0008	0,0001	—
p-value (1–8)	0,0003	0,0005	0,0029	0,0003	—
p-value (1–7)	0,0008	0,0015	0,0148	0,0006	—
p-value (1–6)	0,0015	0,0028	0,1103	0,0015	—
p-value (1–5)	0,0030	0,0039	0,0935	0,0030	—
p-value (1–4)	0,0074	0,0074	0,8254	0,0074	—
p-value (1–3)	0,0183	0,0183	1,0	0,0183	—

Примечание. Каждое значение выражено как среднее значение ± стандартное отклонение ($n = 4$). нпо — ниже предела обнаружения. Средние значения, обозначенные разными строчными буквами (a, b, c, d, e) в столбце, существенно различались ANOVA, критерий Тьюки ($p < 0,05$). Средние значения, обозначенные разными заглавными буквами в строке (A, B, C), существенно различались ANOVA, критерий Тьюки ($p < 0,05$). p-value — достоверная разница, критерий Фридмана, ($p < 0.05$).



а б

Рисунок 2. **Зависимость показателей АОП экстрактов пшеничных отрубей от продолжительности ферментативной экстракции, где: а — ОАЕ, определенная методами FRAP, DPPH и ORAC, б — общее количество фенольных соединений**

Figure 2. **Dependence of the AOP parameters of the wheat bran extracts on the duration of enzymatic extraction: а — TAC determined by the FRAP, DPPH and ORAC methods; б — total phenolic compounds**

экстракции с 1 до 8 ч от 2,39 ± 0,01 до 3,10 ± 0,04 мкмоль-экв. Q/г отрубей ($p < 0,05$), после чего дальнейшее увеличение времени процесса до 9 ч не приводило к статистически значимым изменениям. При этом в период от 3 до 7 ч включительно максимальное увеличение OAE_{FRAP} составило всего 3,28 % ($p < 0,05$). Полученные данные свидетельствуют о постепенном накоплении в экстрактах соединений с выраженными восстановительными свойствами.

Общая антиоксидантная емкость по методу ORAC характеризовалась наиболее выраженными изменениями в зависимости от времени экстракции и имело две фазы. В течение первых 6 ч значения OAE_{ORAC} изменялись незначительно и находились в диапазоне 3,46–3,86 мкмоль-экв. Q/г отрубей ($p > 0,05$). Однако с 7 ч наблюдался резкий рост показателя более чем на 20 % при 7 ч экстракции ($p < 0,05$) и на 38 % при 8 ч ($p < 0,05$), при этом при увеличении времени до 9 ч OAE_{ORAC} соответствовала значению при 8 ч ($p > 0,05$). В связи с тем, что метод ORAC отражает способность АО нейтрализовать пероксильные радикалы, можно сделать предположение, что выявленный эффект связан с накоплением продуктов более глубокой ферментативной деструкции полисахаридной матрицы и высвобождением связанных фенольных кислот, прежде всего феруловой кислоты.

В случае OAE_{DPPH} характер изменений был менее выраженным. Показатель увеличивался к 3 ч на 15 % ($p < 0,05$) в сравнении с 1 ч, а затем был практически неизменным до 7 ч экстракции включительно ($p > 0,05$). Максимальное значение OAE_{DPPH} отмечалось при 8 ч, что превышало показатель 3 ч экстракции всего на 5,0 % ($p < 0,05$) и не отличалось от 9 ч ($p > 0,05$). Вероятно, соединения, способные эффективно взаимодействовать с азотсодержащим радикалом DPPH, высвобождаются на ранних стадиях гидролиза, тогда как дальнейшая ферментативная деструкция преимущественно приводит к накоплению соединений с иным механизмом антиоксидантного действия. Полученные закономерности согласуются с наблюдениями, описанными в работе Bautista-Expósito et al. [31] авторами было показано, что увеличение времени ферментативного гидролиза ПО приводило к росту показателей ORAC и FRAP, тогда как на рост значений ABTS и DPPH влияла температура, а не длительность процесса.

Изменения ОКФС подтвердили эффективность увеличения времени ферментативной обработки. В первые 4 часа наблюдался рост ОКФС на 26,3 % ($p < 0,05$) от 11,06 ± 0,17 до 13,97 ± 0,31 мкмоль-экв. G/г отрубей с последующим снижением показателя на 7,2 % ($p < 0,05$) при 5 ч. После чего вновь отмечалось постепенное увеличение значений. Интересно, что величина ОКФС при 4 ч и 7 ч инкубации не имели статистической разницы ($p > 0,05$). Максимальные значения ОКФС были характерны для образцов, полученных после 8 ч и 9 ч экстракции (14,19 ± 0,18 и 14,14 ± 0,14 мкмоль-экв. G/г отрубей, соответственно) при этом различия между ними отсутствовали ($p > 0,05$). Аналогичные закономерности были описаны в работе Rani et. al. [43], где увеличение продолжительности ферментативной обработки сопровождалось ростом выхода фенольных соединений до достижения максимума, после чего дальнейшее увеличение времени экстракции не приводило к дополнительному росту показателя.

Следует отметить, что снижение ОКФС при 5 ч инкубации сопровождалось уменьшением $OAE_{ORAC,}$ тогда как последующее увеличение продолжительности процесса приводило к одновременному росту обоих показателей с достижением максимальных значений при 8 ч. Вероятно, выявленная динамика связана с промежуточными стадиями ферментативного гидролиза, сопровождающимися частичной трансформацией или нестабильностью отдельных ФС. При дальнейшем увеличении продолжительности обработки происходило более полное разрушение сложноэфирных связей между фенольными кислотами и арабиноксиланами клеточной стенки, что обеспечивало дополнительное высвобождение связанных фенольных соединений. Подобные закономерности согласуются с литературными данными о постепенном высвобождении связанных фенольных кислот в процессе ферментативного гидролиза пшеничных отрубей [34].

Так как концентрация α-амилазы и β-глюканазы составила 1 %, значения ОКФ также находились ниже предела обнаружения используемого метода и не изменялись при увеличении времени экстракции.

Совокупность полученных результатов показывает, что увеличение продолжительности ферментативной экстракции способствует постепенному высвобождению связанных антиоксидантов и росту АОП экстрактов. При этом различные методы оценки ОАЕ демонстрировали неодинаковую динамику изменений, что подтверждает сложный многокомпонентный состав экстрактов и различие механизмов антиоксидантного действия отдельных групп соединений. Наиболее перспективной продолжительностью процесса можно считать 7–8 ч, при которой наблюдались максимальные значения OAE_{ORAC} и ОКФС, тогда как дальнейшее увеличение времени экстракции не приводило к статистически значимому улучшению исследуемых показателей.

4. Выводы

В ходе работы было исследовано влияние концентрации ферментов и продолжительности экстракции на параметры антиоксидантного потенциала экстрактов пшеничных отрубей. Установлено, что ферментативная обработка с использованием комплекса α-амилазы, β-глюканазы и ксиланазы способствует увеличению общей антиоксидантной емкости и содержания фенольных соединений в экстрактах. Повышение концентрации ферментов и продолжительности экстракции сопровождалось ростом показателей OAE_{FRAP} и OAE_{ORAC}, что может свидетельствовать о постепенном высвобождении связанных фенольных соединений, ассоциированных с полисахаридной матрицей пшеничных отрубей. Наиболее эффективными условиями процесса являлись использование 1 % α-амилазы и β-глюканазы в сочетании с 2 % ксиланазы при продолжительности экстракции 7–8 ч, обеспечивающие максимальные значения OAE_{ORAC} и общего количества фенольных соединений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / REFERENCES

1. Carocho, M., Morales, P., Ferreira, I.C.F.R. (2018). Antioxidants: Reviewing the chemistry, food applications, legislation and role as preservatives. *Trends in Food Science and Technology*, 71, 107–120. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.11.008
2. Gutiérrez-del-Río, I., López-Ibáñez, S., Magadán-Corpas, P., Fernández-Calleja, L., Pérez-Valero, Á., Tuñón-Granda, M. et al. (2021). Terpenoids and polyphenols as natural antioxidant agents in food preservation. *Antioxidants*, 10(8), Article 1264. https://doi.org/10.3390/antiox10081264
3. Bensid, A., El Abed, N., Houicher, A., Regenstein, J.M., Özogul, F. (2022). Antioxidant and antimicrobial preservatives: Properties, mechanism of action and applications in food — A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 62(11), 2985–3001. https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1862046
4. Lourenço, S.C., Moldão-Martins, M., Alves, V.D. (2019). Antioxidants of natural plant origins: From sources to food industry applications. *Molecules*, 24(22), Article 4132. https://doi.org/10.3390/molecules24224132
5. Usoro, E. (2024). Comparative Analysis of natural vs. synthetic antioxidants in Nigeria. *Journal of Chemistry*, 3(3), 27–37. https://doi.org/10.47672/jchem.2515
6. Shori, A.B. (2022). Storage quality and antioxidant properties of yogurt fortified with polyphenol extract from nutmeg, black pepper, and white pepper. *Electronic Journal of Biotechnology*, 57, 24–30. https://doi.org/10.1016/j.ejbt.2022.03.003
7. Rashwan, A.K., Osman, A.I., Chen, W. (2023). Natural nutraceuticals for enhancing yogurt properties: A review. *Environmental Chemistry Letters*, 21, 1907–1931. https://doi.org/10.1007/s10311-023-01588-0
8. Rahaman, Md. M., Hossain, R., Herrera-Bravo, J., Islam, M.T., Atolani, O., Adeyemi, O.S. et al. (2023). Natural antioxidants from some fruits, seeds, foods, natural products, and associated health benefits: An update. *Food Science and Nutrition*, 11, 1657–1670. https://doi.org/10.1002/fsn3.3217
9. Агапкин, А.М., Махотина, И.А. (2021). Переработка сельскохозяйственных отходов: рынок органических удобрений и производство органических пищевых продуктов. *Хранение и переработка сельхозсырья*, 3, 212–225. [Agapkin, A.M., Makhotina, I.A. (2021). Agricultural waste processing: Organic fertilizer market and organic food production. *Storage and Processing of Farm Products,* 3, 212–225. (In Russian)] https://doi.org/10.36107/spfp.2021.221
10. Onipe, O.O., Jideani, A.I.O., Beswa, D. (2015). Composition and functionality of wheat bran and its application in some cereal food products. *International Journal of Food Science and Technology*, 50(12), 2509–2518. https://doi.org/10.1111/ijfs.12935
11. Федеральная служба государственной статистики. (2024). Динамика промышленного производства в 2023 году. [Federal State Statistics Service. (2024). Dynamics of industrial production in 2023 (In Russian)] Retrieved from https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/10_31-01-2024.html Accessed June 01, 2026.
12. Li, C., Stump, M., Wu, W., Li, Y. (2023). Exploring the chemical composition, antioxidant potential, and bread quality effects of the nutritional powerhouse: Wheat bran — A mini-review. *Journal of Agriculture and Food Research*, 14, Article 100898. https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100898
13. Chen, Z., Mense, A.L., Brewer, L.R., Shi, Y.-C. (2024). Wheat bran layers: Composition, structure, fractionation, and potential uses in foods. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 64, 6636–6659. https://doi.org/10.1080/10408398.2023.2171962
14. Лукьянчикова, Н.Л., Скрябин, В.А., Табанюхов, К.А. (2020). Особенности состава отрубей пшеницы и ржи и их роль в профилактике хронических заболеваний человека. *Инновации и продовольственная безопасность*, 4(30), 41–58. [Lukyanchikova, N.L., Skryabin, V.A., Tabanyukhov, K.A. (2020). Peculiarities of the composition of wheat and rye bran and their role in the prevention of chronic diseases of human review. *Innovations and Food Safety*, 4(30), 41–58. (In Russian)] https://doi.org/10.31677/2072-6724-2020-30-4-41-58
15. Martín-García, B., Gómez-Caravaca, A.M., Marconi, E., Verardo, V. (2021). Distribution of free and bound phenolic compounds, and alkylresorcinols in wheat aleurone enriched fractions. *Food Research International*, 140, Article 109816. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109816

16. Yao, W., Gong, Y., Li, L., Hu, X., You, L. (2022). The effects of dietary fibers from rice bran and wheat bran on gut microbiota: An overview. *X Food Chemistry: X*, 13, Article 100252. https://doi.org/10.1016/j.fochx.2022.100252
17. Leschonski, K.P., Mortensen, M.S., Hansen, L.B.S., Krogh, K.B.R.M., Kabel, M.A., Laursen, M.F. (2024). Structure-dependent stimulation of gut bacteria by arabinoxylo-oligosaccharides (AXOS): A review. *Gut Microbes*, 16(1), Article 2430419. https://doi.org/10.1080/19490976.2024.2430419
18. Broekaert, W.F., Courtin, C.M., Verbeke, K., Van de Wiele, T., Verstraete, W., Delcour, J.A. (2011). Prebiotic and other health-related effects of cereal-derived arabinoxylans, arabinoxylan-oligosaccharides, and xylooligosaccharides. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition,* 51(2), 178–194. https://doi.org/10.1080/10408390903044768
19. Huang, W., Tian, F., Wang, H., Wu, S., Jin, W., Shen, W. et al (2023). Comparative assessment of extraction, composition, and *in vitro* antioxidative properties of wheat bran polyphenols. *LWT- Food Science and Technology,* 180, Article 114706. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.114706
20. Wen, X., Peng, H., Zhang, H., He, Y., Guo, F., Bi, X. et al (2024). Wheat bran polyphenols ameliorate DSS-induced ulcerative colitis in mice by suppressing MAPK/NF-κB inflammasome pathways and regulating intestinal microbiota. *Foods*, 13(2), Article 225. https://doi.org/10.3390/foods13020225
21. Kang, H., Lee, M.-G., Lee, J.-K., Choi, Y.-H., Choi, Y.-S. (2016). Enzymatically-processed wheat bran enhances macrophage activity and has in vivo anti-inflammatory effects in mice. *Nutrients*, 8(4), Article 188. https://doi.org/10.3390/nu8040188
22. Kobayashi, K., Suzauddula, M., Bender, R., Li, C., Li, Y., Sun, X.S. et al. (2025). Functional properties and potential applications of wheat bran extracts in food and cosmetics: A review of antioxidant, enzyme-inhibitory, and anti-aging benefits. *Foods*, 14(3), Article 515. https://doi.org/10.3390/foods14030515
23. Wu, S., Shen, D., Wang, R., Li, Q., Mo, R., Zheng, Y. et al (2021). Phenolic profiles and antioxidant activities of free, esterified and bound phenolic compounds in walnut kernel. *Food Chemistry,* 350(11), Article 129217. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129217
24. Shahidi, F., Yeo, J. (2016). Insoluble-bound phenolics in food. *Molecules*, 21(9), Article 1216. https://doi.org/10.3390/molecules21091216
25. Bilal, M., Li, D., Xie, C., Yang, R., Gu, Z., Jiang, D. et al (2025). Recent advances of wheat bran arabinoxylan exploitation as the functional dough additive. *Food Chemistry,* 463(Pt 1), Article 141146 https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.141146
26. Xu, D.-P., Li, Y., Meng, X., Zhou, T., Zhou, Y., Zheng, J. et al (2017). Natural antioxidants in foods and medicinal plants: Extraction, assessment and resources. *International Journal of Molecular Sciences,* 18, Article 96. https://doi.org/10.3390/ijms18010096
27. Cavallero, A., Sbrana, C., Fabbri, L.P., Vidotto, F., Pucci, L., Gigante, V. et al. (2025). Comparison of microwave, ultrasound, and ultrasound-microwave assisted extraction on bioactive compounds, antioxidant activities and antimicrobial properties of hemp seed (*Cannabis sativa* L.) and wheat bran extracts. *Food Bioscience*, 69(1), Article 106918. https://doi.org/10.1016/j.fbio.2025.106918
28. Kupaeva, N., Trubina, M., Nesterova, M. (2025). Effects of extraction, purification, and drying on the antioxidant capacity of wheat bran extracts. *Bioactive Compounds in Health and Disease*, 8(10), 398–409. https://doi.org/10.31989/bchd.v8i10.1813
29. Bei, Q., Chen, G., Lu, F., Wu, S., Wu, Z. (2018). Enzymatic action mechanism of phenolic mobilization in oats (*Avena sativa* L.) during solid-state fermentation with *Monascus anka*. *Food Chemisry,* 245, 297–304. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.10.086
30. Ye, G., Wu, Y., Wang, L., Tan, B., Shen, W., Li, X. et al (2021). Comparison of six modification methods on the chemical composition, functional properties and antioxidant capacity of wheat bran. *LWT,* 149, Article 111996. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111996
31. Bautista-Expósito, S., Tomé-Sánchez, I., Martín-Diana, A.B., Frias, J., Peñas, E., Rico, D. et al (2020). Enzyme selection and hydrolysis under optimal conditions improved phenolic acid solubility, and antioxidant and anti-inflammatory activities of wheat bran. *Antioxidants*, 9(10), Article 984. https://doi.org/10.3390/antiox9100984
32. Samoilenko, V.A., Sazonova, O.I., Ivanova, A.A., Vetrova, A.A. (2025). Industrial biotechnology today: Overview of main products. *Biologia et Biotechnologia*, 2 3–38. https://doi.org/10.61847/pbcras.bbt.2025.2.1
33. Jin, X., Wang, J.-K., Wang, Q. (2023). Microbial β-glucanases: Production, properties, and engineering. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 39(4), Article 106. https://doi.org/10.1007/s11274-023-03550-2
34. Ferri, M., Happel, A., Zanaroli, G., Bertolini, M., Chiesa, S., Commisso, M. et al. (2020). Advances in combined enzymatic extraction of ferulic acid from wheat bran. *New Biotechnology*, 56, 38–45. https://doi.org/10.1016/j.nbt.2019.10.010
35. Купаева, Н.В., Ильина, М.А., Светличная, М.В., Зубарев, Ю.Н. (2022). Исследование антиоксидантного потенциала овсяных напитков, обогащенных растительными компонентами. *Пищевые системы*, 5(2), 157–163. [Kupaeva, N.V., Ilina, M.A., Svetlichnaya, M.V., Zubarev, Yu. N. (2022). Study of the antioxidant potential of oat drinks enriched with plant components. *Food Systems*, 5(2), 157–163. (In Russian)] https://doi.org/10.21323/2618-9771-2022-5-2-157-163
36. Chernukha, I., Kupaeva, N., Kotenkova, E., Khvostov, D. (2022). Differences in antioxidant potential of allium cepa husk of red, yellow, and white varieties. *Antioxidants*, 11(7), Article 1243. https://doi.org/10.3390/antiox11071243
37. Вершинин, В.И., Белова, Е.В. (2019). Определение суммарного содержания фенольных антиоксидантов в модельных смесях по методу Фолина-Чокальтеу и по методу FRAP. *Аналитика и контроль*,23(3) б 314–322. [Vershinin, V.I., Belova, E. V. (2019). Determination of the total phenol antioxidants content in the model mixtures using the Folin-Ciocalteu assay and the FRAP assay. *Analytics and Control*, 23(3), 314–322. (In Russian)] https://doi.org/10.15826/analitika.2019.23.3.008
38. Chang, C.-C., Yang, M.-H., Wen, H.-M., Chern, J.-C. (2020). Estimation of total flavonoid content in propolis by two complementary colometric methods. *Journal of Food and Drug Analysis,* 10(3), 178–182. https://doi.org/10.38212/2224-6614.2748
39. Zhu, J., Chen, C., Zhang, B., Huang, Q. (2020). The inhibitory effects of flavonoids on α-amylase and α-glucosidase. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 60(2), 695–708. https://doi.org/10.1080/10408398.2018.1548428
40. Shang, X.-L., Liu, C.-Y., Dong, H.-Y., Peng, H.-H., Zhu, Z.-Y. (2021). Extraction, purification, structural characterization, and antioxidant activity of polysaccharides from Wheat Bran. *Journal of Molecular Structure,* 1233, Article 130096. https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2021.130096
41. Berker, K.I., Olgun, F.A.O., Ozyurt, D., Demirata, B., Apak, R. (2013). Modified folin — ciocalteu antioxidant capacity assay for measuring lipophilic antioxidants. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 61(20), 4783–4791. https://doi.org/10.1021/jf400249k
42. Kim, M., Yoon, W.-J., Kim, S. (2016). Phytochemical compositions of immature wheat bran, and its antioxidant capacity, cell growth inhibition, and apoptosis induction through tumor suppressor gene. *Molecules*, 21(10), Article 1292. https://doi.org/10.3390/molecules21101292
43. Rani, A., Arfat, Y., Aziz, R.S., Ali, L., Ahmed, H., Asim, S. et al (2021). Enzymatically assisted extraction of antioxidant and anti-mutagenic compounds from radish (Raphanus sativus). *Environmental Technology and Innovation*, 23, Article 101620. https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101620

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ	AUTHOR INFORMATION
Принадлежность к организации	**Affiliation**
Купаева Надежда Владимировна — кандидат технических наук, младший научный сотрудник, Экспериментальная клиника-лаборатория биологически активных веществ животного происхождения, ФНЦ пищевых систем им. В. М. Горбатова 109316, Москва, ул. Талалихина 26 E-mail: NVkupaeva@yandex.ru ORCID: http://orcid.org/0000-0002-1066-5589 * автор для контактов	**Nadezhda V. Kupaeva**, Candidate of Technical Sciences, Junior Researcher, Experimental Clinic-Research Laboratory of Biologically Active Substances of an Animal Origin, V. M. Gorbatov Federal Research Center for Food Systems 26, Talalikhin str., 109316, Moscow, Russia E-mail: NVkupaeva@yandex.ru ORCID: http://orcid.org/0000-0002-1066-5589 * corresponding author
Чернуха Ирина Михайловна — доктор технических наук, профессор, академик РАН, главный научный сотрудник, Руководитель Отдела координации инициативных и международных проектов, Федеральный научный центр пищевых систем им. В. М. Горбатова 109316, Москва, ул. Талалихина 26 E-mail: imcher@inbox.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4298-0927	**Irina M. Chernukha**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Academician of the Russian Academy of Sciences, Principal Research Fellow, Head of the Department for Coordination of Initiative and International Projects, V. M. Gorbatov Federal Research Center for Food Systems 26, Talalikhin str., 109316, Moscow, Russia E-mail: imcher@inbox.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4298-0927
Трубина Мария Владимировна — лаборант, Экспериментальная клиника-лаборатория биологически активных веществ животного происхождения, Федеральный научный центр пищевых систем им. В. М. Горбатова 109316, Москва, ул. Талалихина 26 E-mail: marusia.trubina@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0009-0001-2513-633X	**Maria V. Trubina**, Senior Laboratory Assistant, Experimental Clinic-Research Laboratory of Biologically Active Substances of an Animal Origin, V. M. Gorbatov Federal Research Center for Food Systems 26, Talalikhin str., 109316, Moscow, Russia E-mail: marusia.trubina@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0009-0001-2513-633X
Нестерова Мария Дмитриевна — старший лаборант, Экспериментальная клиника-лаборатория биологически активных веществ животного происхождения, Федеральный научный центр пищевых систем им. В. М. Горбатова 109316, Москва, ул. Талалихина 26 E-mail: m.nesterova@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0009-0000-7750-3368	**Maria D. Nesterova**, Senior Laboratory Assistant, Experimental Clinic-Research Laboratory of Biologically Active Substances of an Animal Origin, V. M. Gorbatov Federal Research Center for Food Systems 26, Talalikhin str., 109316, Moscow, Russia E-mail: m.nesterova@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0009-0000-7750-3368

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ	AUTHOR INFORMATION
Принадлежность к организации	**Affiliation**
Кузина Марина Петровна — старший лаборант, Экспериментальная клиника-лаборатория биологически активных веществ животного происхождения, Федеральный научный центр пищевых систем им. В. М. Горбатова 109316, Москва, ул. Талалихина 26 E-mail: m.kuzina@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0009-0007-7826-7097	**Marina P. Kuzina**, Senior Laboratory Assistant, Experimental Clinic-Research Laboratory of Biologically Active Substances of an Animal Origin, V. M. Gorbatov Federal Research Center for Food Systems 26, Talalikhin str., 109316, Moscow, Russia E-mail: m.kuzina@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0009-0007-7826-7097
Критерии авторства	**Contribution**
Купаева Н.В. — концепция и дизайн исследования; постановка цели и задач; статистическая обработка данных; анализ и интерпретация результатов; редактирование и доработка рукописи; научное руководство. **Чернуха И. М.** — редактирование и доработка рукописи; научное руководство; административное сопровождение проекта; привлечение финансирования. **Трубина М. В.** — обзор литературы; проведение экспериментов; анализ и интерпретация результатов; подготовка первоначального варианта рукописи. **Нестерова М. Д.** — обзор литературы; проведение экспериментов; подготовка первоначального варианта рукописи. **Кузина М. П.** — обзор литературы; статистическая обработка данных; проведение экспериментов; анализ и интерпретация результатов; визуализация данных; подготовка первоначального варианта рукописи.	**Nadezhda V. Kupaeva** — conceptualization and study design; formulation of research objectives; statistical analysis; data analysis and interpretation; manuscript review and editing; supervision. **Irina M. Chernukha** — manuscript review and editing; supervision; project administration; funding acquisition. **Maria V. Trubina** — literature review; experimental investigation; data analysis and interpretation; preparation of the original draft. **Maria D. Nesterova** — literature review; experimental investigation; preparation of the original draft. **Marina P. Kuzina** — literature review; statistical analysis; experimental investigation; data analysis and interpretation; data visualization; preparation of the original draft.
Конфликт интересов	**Conflict of interest**
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.	The authors declare no conflict of interest.

DOI: https://doi.org/10.21323/2618-9771-2026-9-2-337-346

Поступила 14.01.2026
Поступила после рецензирования 18.06.2026
Принята в печать 22.06.2026
© Петров С. М., Подгорнова Н. М., 2026

https://www.fsjour.com/jour
Обзорная статья
Открытый доступ

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИ ЗНАЧИМЫХ ХАРАКТЕРИСТИК САХАРНОГО СИРОПА И СВЕКЛОВИЧНОЙ МЕЛАССЫ

Петров С. М.[1]*, Подгорнова Н. М.[2]

[1] Московский государственный университет технологий и управления имени К. Г. Разумовского (Первый казачий университет), Москва, Россия
[2] Московский политехнический университет, Москва, Россия

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:
сахароза, бетаин, минеральные вещества, пищевая ценность, функциональные ингредиенты, биотехнология, циркулярная экономика

АННОТАЦИЯ

Продукты глубокой переработки сахарной свеклы, такие как сироп и меласса, представляют значительный интерес для пищевой и биотехнологической промышленности в качестве источников не только углеводов, но и широкого спектра биологически активных соединений. Детальное знание их состава необходимо для оптимизации использования и разработки новых функциональных продуктов. В данном обзоре систематизированы современные данные о химическом составе сиропа из сахарной свеклы и свекловичной мелассы на основе анализа более 80 научных публикаций. Основное внимание уделено количественному содержанию углеводов, минеральных веществ, органических кислот, витаминов, аминокислот и специфических компонентов, таких как бетаин. Проанализированы и сравнены профили продуктов на разных стадиях переработки. Установлено, что оба продукта характеризуются высоким содержанием сахарозы (45–65 %), но существенно различаются по уровню несахаров. Свекловичная меласса содержит в 2–3 раза больше минеральных веществ (7–12 % против 2–4 % в сиропе), в особенности калия (3,5–5,5 %), и является концентрированным источником бетаина (4–6 %). Показаны качественные отличия от тростниковой мелассы, включая минимальное содержание инвертных сахаров (< 1 %) и наличие бетаина. Обсуждена пищевая, кормовая и биотехнологическая ценность продуктов. Сироп и меласса из сахарной свеклы являются ценными многокомпонентными продуктами с высокой пищевой и биологической ценностью. Их состав определяет широкие возможности применения не только в качестве подсластителей, но и как источников минералов, витаминов группы В и функциональных ингредиентов для производства пробиотиков, пребиотиков и обогащенных пищевых систем. Для расширения сфер применения необходимы дальнейшие исследования, направленные на стандартизацию состава и разработку технологий модификации.

Received 14.01.2026
Accepted in revised 18.06.2026
Accepted for publication 22.06.2026
© Petrov S. M., Podgornova N. M., 2026

Available online at https://www.fsjour.com/jour
Review article
Open access

COMPARATIVE ANALYSIS OF TECHNOLOGICALLY SIGNIFICANT CHARACTERISTICS OF SUGAR BEET SYRUP AND MOLASSES

Sergey M. Petrov[1]*, Nadezhda M. Podgornova[2]

[1] Moscow State University of Technologies and Management named after K. G. Razumovsky (First Cossack University), Moscow, Russia
[2] Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia

KEYWORDS:
sucrose, betaine, minerals, nutritional value, functional ingredients, biotechnology, circular economy

ABSTRACT

Deep processing products of sugar beet, such as syrup and molasses, are of significant interest to the food and biotechnology industries as sources not only of carbohydrates but also of a wide range of biologically active compounds. Detailed knowledge of their composition is essential for optimizing their use and developing new functional products. This review systematizes current data on the chemical composition of sugar beet syrup and beet molasses based on the analysis of more than 80 scientific publications. Primary focus is placed on the quantitative content of carbohydrates, minerals, organic acids, vitamins, amino acids, and specific components such as betaine. The profiles of the products at different processing stages are analyzed and compared. It has been established that both products are characterized by a high sucrose content (45–65 %), but differ significantly in the level of non-sugars. Beet molasses contains 2–3 times more minerals (7–12 % vs. 2–4 % in syrup), especially potassium (3.5–5.5 %), and is a concentrated source of betaine (4–6 %). Qualitative differences from cane molasses are shown, including minimal invert sugar content (<1 %) and the presence of betaine. The nutritional, feed, and biotechnological value of the products is discussed. Sugar beet syrup and molasses are valuable multicomponent products with high nutritional and biological value. Their composition determines wide possibilities for application not only as sweeteners but also as sources of minerals, B vitamins, and functional ingredients for the production of probiotics, prebiotics, and enriched food systems. Further research aimed at standardizing the composition and developing modification technologies is necessary to expand their fields of application.

1. Введение

Сахарная свекла (*Beta vulgaris*) остается одной из ключевых культур для производства сахара в регионах с умеренным климатом. Состав свеклы включает витамины А, В, С и Р, а также минералы, такие как цинк, натрий, магний, калий, кальций, железо, фосфор и бром [1]. Химический состав сахарной свеклы приведен в Таблице 1 [2,3].

В процессе переработки сахарной свеклы, помимо целевого продукта — сахарозы, образуются значительные объемы промежуточных и побочных продуктов, среди которых наиболее технологически значимыми являются сахарный сироп и свекловичная меласса [4,5]. Исторически эти продукты рассматривались преимущественно как полуфабрикаты, кормовые добавки или субстраты для ферментационных

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: **Петров, С. М., Подгорнова, Н. М.** (2026). Сравнительный анализ технологически значимых характеристик сахарного сиропа и свекловичной мелассы. *Пищевые системы*, 9(2), 337–346. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2026-9-2-337-346

FOR CITATION: **Petrov, S. M., Podgornova, N. M.** (2026). Comparative analysis of technologically significant characteristics of sugar beet syrup and molasses. *Food Systems,* 9(2), 337–346. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2026-9-2-337-346

процессов. Однако в последние десятилетия в связи с ростом интереса к функциональному питанию и биоэкономике внимание исследователей и технологов сместилось в сторону их комплексного использования [6–9]. Глобальный тренд на снижение пищевых отходов и циркулярную экономику превращает такие полуфабрикаты и побочные продукты в ценные ресурсы для получения высокомаржинальных ингредиентов.

Таблица 1. **Химический состав сахарной свеклы**
Table 1. **Chemical composition of sugar beet**

Компонент	Единица измерения	Среднее	Минимум	Максимум
Энергия	кДж	345	333	361
Вода	г	77,60	75,94	78,81
Минеральные компоненты (зола)	г	0,80	0,64	1,01
Белок	г	0,51	0,12	0,77
Азот	г	0,08	0,02	0,12
Жир, всего	г	0,15	0,11	0,24
Углеводы	г	18,54	17,66	19,14
Клетчатка, всего в рационе	г	2,41	1,06	3,84
Волокно, растворимое в воде	г	1,05	0,06	2,59
Волокно, нерастворимое в воде	г	1,35	0,99	2,38
Сахароза	г	13,67	6,43	17,00
Глюкоза	г	0,03	0,00	0,10
Фруктоза	г	0,03	0,00	0,07
Лактоза	г	0,00	0,00	0,00
Мальтоза	г	0,00	0,00	0,00
Соль, NaCl	мг	185	49	237
Железо, Fe	мг	0,62	0,32	0,89
Фосфор, P	мг	19	10	27
Кальций, Ca	мг	30	22	40
Магний, Mg	мг	48	31	54
Калий, K	мг	172	127	202
Натрий, Na	мг	74	20	95
Цинк, Zn	мг	0,19	0,13	0,26
Витамин C	мг	4,9	4,2	5,6
L-аскорбиновая кислота	мг	3,7	3,1	4,5
Тиамин (витамин B_1)	мг	0,019	0,007	0,031
Рибофлавин (витамин B_2)	мг	0,036	0,020	0,050
Ниацин (витамин PP)	мг	0,264	0,218	0,344
Витамин B_6, общий	мг	0,033	0,030	0,038
Витамин A	РЕ	3	3	3
Бета-каротин	мкг	38	35	41
Ликопин	мкг	0	0	0
Лютеин	мкг	7	0	12

Примечание: количество компонентов указано для массы 100 г продукта.

Сироп, получаемый на промежуточных стадиях выпаривания очищенного сока, и меласса — конечный остаточный продукт после кристаллизации сахара, обладают сложным и богатым химическим составом. Помимо доминирующей сахарозы, они содержат целый спектр сопутствующих веществ: другие углеводы (глюкозу, фруктозу, раффинозу), макро- и микроэлементы, органические кислоты, витамины, аминокислоты и уникальные для свеклы соединения, такие как бетаин [10–14]. Этот состав не только определяет их питательную ценность, но и влияет на технологические свойства при использовании в пищевых системах, кормах или биотехнологии. Например, реологические характеристики, гигроскопичность, цветность и антиоксидантная активность напрямую зависят от соотношения сахаров, органических кислот и меланоидинов.

Сироп из сахарной свеклы представляет собой полуфабрикат сахарного производства, получаемый в результате выпаривания воды из очищенного диффузионного сока или очищенного раствора сахара-сырца в выпарной установке [11]. Свекловичная меласса является побочным продуктом сахарного производства и представляет собой межкристальный раствор, отделяемый при центрифугировании утфеля последней ступени кристаллизации. Дальнейшее извлечение из него кристаллической сахарозы экономически нецелесообразно [12].

Понимание детального химического состава этих продуктов имеет важное значение для оптимизации технологических процессов их производства и переработки, оценки пищевой и биологической ценности, а также для разработки новых направлений их применения в пищевой, фармацевтической и биотехнологической промышленности [6,10]. В последние десятилетия наблюдается растущий интерес к использованию свекловичной мелассы и сиропа в качестве субстратов для ферментационных процессов, производства биологически активных веществ, а также в качестве функциональных пищевых ингредиентов [7,15]. Потенциал их применения выходит за рамки традиционных областей, включая создание биопластиков, косметических средств и даже электрохимических систем.

Производство сахара из сахарной свеклы включает несколько основных технологических стадий: экстракцию сахаров из свекловичной стружки, очистку свекловичного сока, концентрирование и кристаллизацию сахарозы [16]. На разных этапах этого процесса образуются промежуточные и конечные продукты с различным химическим составом, что определяет их дальнейшую судьбу в производственной цепочке.

Сироп из сахарной свеклы получают путем выпаривания очищенного свекловичного сока до концентрации сухих веществ 60–70 %. Этот продукт отличается высоким содержанием сахарозы (обычно 55–65 % от сухого вещества) и относительно низким содержанием несахаров по сравнению с мелассой [17,18]. Сироп может использоваться как самостоятельный продукт в пищевой промышленности (например, в кондитерских изделиях, соусах) [19] или направляться на дальнейшую кристаллизацию сахара [20–22]. Его технологические преимущества включают хорошую растворимость, умеренную вязкость и нейтральный вкусовой профиль [23,24].

Свекловичная меласса представляет собой вязкую темно-коричневую жидкость, которая остается после максимально возможного извлечения кристаллической сахарозы из свекловичного сиропа [12,25]. Меласса содержит 40–60 % по массовой доле сахаров, преимущественно сахарозы, а также значительное количество несахаров, включая минеральные вещества, органические кислоты, азотсодержащие соединения и другие компоненты. За последнее десятилетие биотопливо, полисахариды, олигосахариды, органические кислоты и ферменты были получены из мелассы через путь брожения, что обеспечило ей ряд важных применений в пищевой промышленности, фармацевтике и биотехнологии. Однако из-за сложностей, связанных с хранением, стерилизацией, упаковкой и транспортировкой, потенциал промышленного производства и коммерческого использования мелассы для получения биопродуктов с высокой добавленной стоимостью реализован не в полной мере [5].

Существует два основных типа мелассы: мягкая и твердая. Они различаются по концентрации растворимых солей кальция и магния, которые придают продукту жесткость [25]. Это различие критично для ее использования в кормах или как добавки, влияющей на структуру пищевых продуктов.

Химический состав свекловичной мелассы существенно зависит от качества исходного сырья, условий выращивания сахарной свеклы, технологических параметров переработки и степени истощения меласса [10,26,27]. Важным показателем качества мелассы является так называемая истинная чистота (true purity), которая отражает соотношение сахарозы к общему содержанию сухих веществ [28]. Этот показатель является ключевым как для сахарного производства (определяя экономику процесса), так и для конечных потребителей, которым важна предсказуемость состава.

Несмотря на существование ряда исследований, посвященных отдельным аспектам состава, в научной литературе ощущается недостаток современных систематизированных обзоров, дающих сравнительную количественную оценку сиропа и мелассы на основе данных, полученных с применением современных аналитических методов (ВЭЖХ, ИСП-ОЭС, капиллярный электрофорез). Кроме того, требует уточнения их сравнение с распространенными аналогами, например, тростниковой мелассой, для обоснования целесообразности применения в конкретных технологиях [13,29].

Целью настоящего обзора является систематизация и сравнительный анализ современных научных данных о детальном химическом составе сиропа из сахарной свеклы и свекловичной мелассы, оценка их пищевой и биологической ценности, а также потенциала применения в качестве функциональных ингредиентов в пищевых системах и биотехнологических процессах. В задачи работы входит:

1) обобщение данных по макро- и микрокомпонентному составу; 2) выявление ключевых различий между сиропом и мелассой; 3) сравнение свекловичных продуктов с тростниковыми аналогами; 4) оценка влияния состава на функционально-технологические свойства; 5) анализ современных методов контроля состава; 6) формулирование перспективных направлений для исследований и практического применения.

2. Объекты и методы исследования

Объектом данного аналитического обзора выступили научные данные, характеризующие химический состав двух ключевых продуктов переработки сахарной свеклы: сиропа (промежуточный концентрат с содержанием сухих веществ 60–70%) и свекловичной мелассы (конечный остаточный сироп с содержанием сухих веществ 75–85%, из которого дальнейшая кристаллизация сахарозы экономически нецелесообразна). Для сравнения также привлекались данные по тростниковой мелассе — основному мировому аналогу свекловичной мелассы.

Методологической основой работы послужил анализ публикаций в международных рецензируемых журналах, индексируемых в базах данных Scopus, Web of Science, PubMed, а также в профильных национальных изданиях. Поиск литературы проводился с использованием ключевых слов на русском и английском языках: «сахарная свекла», «свекловичный сироп», «свекловичная меласса», «химический состав», «бетаин», «sugar beet», «beet syrup», «beet molasses», «chemical composition». Критериями включения публикаций были: актуальность (преимущественно не старше 7 лет), наличие количественных данных по составу, описание примененных аналитических методов. Всего для подготовки обзора было отобрано и проанализировано более 80 научных работ, включая оригинальные исследования, обзоры и методические статьи, посвященные методам анализа. Особое внимание уделялось работам, в которых использовались инструментальные методы (хроматография, спектрометрия), обеспечивающие высокую точность данных.

Для обработки и сравнения данных использовались методы систематизации и сравнительного анализа. Количественные показатели по каждому классу соединений (углеводы, минералы, кислоты и пр.) были сгруппированы по продукту (сироп/меласса), а диапазоны значений обобщены на основе данных из разных источников с учетом возможной вариабельности, обусловленной сортом свеклы, условиями выращивания и технологией переработки. При наличии противоречивых данных указывался диапазон, охватывающий большинство литературных источников. Для наглядности ключевые сравнительные данные были сведены в сводные таблицы.

3. Состав, основные компоненты, минеральные вещества

3.1. Углеводный состав и основные компоненты

Основу сухого вещества как сиропа, так и мелассы составляют углеводы, главным из которых является сахароза. В сиропе ее содержание достигает 55–65% от сухого вещества (СВ), в то время как в мелассе вследствие многократной кристаллизации оно снижается до 45–52% СВ [30,31]. Важным отличием свекловичных продуктов от тростниковых аналогов является крайне низкое содержание инвертных сахаров (глюкозы и фруктозы), обычно не превышающее 1–2% СВ, что связано с меньшей кислотностью среды при переработке свеклы и с активностью инвертазы [32]. Этот фактор имеет большое технологическое значение: низкое содержание редуцирующих сахаров минимизирует реакции Майяра при термообработке, что позволяет сохранять светлый цвет продуктов на основе свекловичного сиропа. Существенную роль играет олигосахарид раффиноза, который не кристаллизуется и накапливается в мелассе (1–2% СВ), влияя на ее вязкость и кристаллизационные свойства [19,33]. Раффиноза также известна как пребиотик, стимулирующий рост бифидобактерий.

Углеводы свекловичного сахарного сиропа составляют основную массу сухого вещества. Главным компонентом является сахароза (дисахарид, состоящий из глюкозы и фруктозы), содержание которой в сиропе обычно составляет 55–65% от общей массы сухого вещества [11]. Высокое содержание сахарозы обуславливает его основное применение в качестве подсластителя и сырья для дальнейшей кристаллизации.

Помимо сахарозы, в сиропе присутствуют моносахариды — глюкоза и фруктоза, образующиеся в результате частичной инверсии (гидролиза) сахарозы. Содержание инвертных сахаров в свекловичном сиропе обычно не превышает 1–2% [25], что значительно ниже, чем в тростниковых продуктах. Это связано с более мягкими условиями переработки сахарной свеклы (оптимальный pH 8,5–9,2) и меньшей активностью эндогенных инвертаз по сравнению с тростниковым сырьем.

Важным компонентом углеводного профиля является раффиноза — трисахарид, состоящий из галактозы, глюкозы и фруктозы. Раффиноза присутствует в сиропе в концентрации от 0,5 до 1,5% [31]. Этот олигосахарид не кристаллизуется вместе с сахарозой и переходит в мелассу, влияя на процессы кристаллизации. Его наличие может служить индикатором степени очистки сиропа.

Кроме того, в сиропе могут присутствовать следовые количества других олигосахаридов, в том числе кестозы и других фруктоолигосахаридов, которые могут образовываться ферментативным путем [6]. Эти соединения представляют интерес как пребиотические компоненты.

Углеводы свекловичной мелассы составляют 40–60% (м/м) от общей массы [5,25]. Углеводный состав мелассы более сложный по сравнению с сиропом из-за концентрирования несахаров в процессе многократной кристаллизации сахарозы.

Сахароза остается основным углеводом мелассы, составляя 45–52% от сухого вещества [12,13,34]. Содержание сахарозы в мелассе зависит от эффективности процесса кристаллизации и истощения мелассы, которое, в свою очередь, определяется технологическим режимом и качеством сырья.

Инвертные сахара (глюкоза и фруктоза) в свекловичной мелассе присутствуют в низких концентрациях, обычно не превышающих 1% [25]. Это характерная особенность свекловичной мелассы, отличающая ее от тростниковой, где содержание инвертных сахаров может достигать 15–25% [11]. Низкое содержание редуцирующих сахаров является преимуществом при использовании мелассы в некоторых биотехнологических процессах, где они могут угнетать рост микроорганизмов (эффект катаболитной репрессии), однако это также снижает ее антикристаллизационные свойства в кондитерской промышленности.

Раффиноза концентрируется в мелассе и может составлять 1–2% от сухого вещества [11,31,35]. Раффиноза не кристаллизуется вместе с сахарозой и полностью переходит в мелассу, влияя на ее вязкость и кристаллизационные свойства. Она также может служить субстратом для производства рафинозы или других олигосахаридов.

Методы высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ) позволяют точно определять содержание сахарозы, глюкозы, фруктозы и раффинозы в мелассе [31]. Ионная хроматография с импульсным амперометрическим детектированием также широко используется для анализа углеводного состава [36]. Эти методы обеспечивают высокую селективность и точность, необходимые для контроля качества и технологического процесса.

3.2. Минеральные вещества (зольность)

Наиболее яркое различие между продуктами переработки сахарной свеклы наблюдается в содержании минеральных веществ (зольности). Если в сиропе их доля составляет 2–4% от сухого вещества (СВ), то в мелассе как в концентрате несахаров она возрастает до 7–12% СВ [10,25]. Это обусловлено закономерным концентрированием неорганических компонентов по мере извлечения сахарозы на различных технологических стадиях: от сырого сока с минимальной зольностью через очищенный и сгущенный соки до конечных продуктов — сиропа и мелассы.

Преобладающим катионом в обоих продуктах является калий (K): 1,5–3,0% СВ в сиропе и 3,5–5,5% СВ в мелассе (35–55 г/кг) [12,13]. Высокое содержание калия делает мелассу ценным источником этого элемента для кормовых и пищевых целей. Также значимо присутствие других макроэлементов:

- Натрий (Na): 0,5–1,5% СВ в сиропе и 0,8–2,0% СВ в мелассе [12,25].
- Кальций (Ca): 0,1–0,3% СВ в сиропе и 0,2–0,5% СВ в мелассе. Его содержание зависит от методов очистки сока (дефекация-сатурация) [16,25].
- Магний (Mg): 0,05–0,15% СВ в сиропе и 0,1–0,3% СВ в мелассе [16,25].
- Фосфор (P) и сера (S) также обнаруживаются, особенно в мелассе (P: 0,05–0,15% СВ; S: 0,3–0,6% СВ) [11,25].

Соотношение и концентрация минеральных веществ зависят от почвенно-климатических условий выращивания свеклы, от применяемых агротехнических приемов и конкретных технологических операций [10,26].

Помимо макроэлементов, в продуктах присутствуют *микроэлементы*, концентрация которых также возрастает в мелассе. К ключевым относятся:

- Железо (Fe): 5–50 мг/кг СВ в сиропе и 10–360 мг/кг СВ в мелассе [11,37].
- Цинк (Zn): 0,5–5 мг/кг СВ в сиропе и 1–11 мг/кг СВ в мелассе [11,38].

- Медь (Cu): 0,1–3 мг/кг СВ в сиропе и 0,5–7 мг/кг СВ в мелассе [25,37].
- Марганец (Mn): 0,5–10 мг/кг СВ в сиропе и 1–50 мг/кг СВ в мелассе [25,37].

Комплекс микроэлементов, наряду с высоким содержанием калия, обуславливает ценность мелассы как источника минералов для обогащения продуктов.

Химические формы и распределение элементов в матрице продукта существенно различаются. Данные спектроскопических исследований подтверждают, что основная часть золы представлена растворимыми ионами щелочных металлов (K^+, Na^+), что проявляется в тесной корреляции между зольностью и электропроводностью [39]. В то же время значительная доля двухвалентных катионов (Ca^{2+}, Mg^{2+}) и особенно переходных металлов (Fe, Cu, Zn, Mn) ассоциирована с органическими компонентами (например, с гуминовыми кислотами, пептидами, меланоидинами) или коллоидными фазами [11]. Это влияет на их биодоступность и создает трудности для аналитического определения, часто требующего предварительного разрушения органической матрицы (минерализации пробы).

В процессе переработки происходит не только количественное концентрирование элементов, но и изменение их форм. В конечных сиропах и мелассе щелочные катионы остаются преимущественно в растворимой ионной форме, тогда как переходные металлы в большей степени связаны с органическим веществом [25].

В контексте анализа металлы в продукции сахарной свеклы можно классифицировать следующим образом:

1. Переходные металлы (Fe, Cu, Zn, Mn, Cr, Ni): часто являются необходимыми микроэлементами, но их содержание требует контроля [37,38].
2. Тяжелые металлы-загрязнители (Pb, Cd, As): не имеют полезной биологической функции, токсичны даже в следовых количествах. Их присутствие связано главным образом с экологическим фоном (почва, вода). В промышленных образцах могут обнаруживаться на уровне микрограммов на килограмм (например, Pb ~20 мкг/кг, Cd ~3,5 мкг/кг) и подлежат строгому мониторингу [37].

Сравнительная таблица содержания металлов в продуктах переработки сахарной свеклы (Таблица 2) отображает типичные диапазоны концентраций, основанные на аналитических данных из различных источников. Важно отметить, что абсолютные значения сильно зависят от региона выращивания, агрохимии, технологии переработки и метода анализа.

Таблица 2. **Типичные диапазоны концентраций минеральных веществ**

Table 2. **Typical composition ranges of minerals**

Группа / Металл	Сырой свекловичный сок	Сахарный сироп	Свекловичная меласса	Примечания (методы детекции, спецификация)	Источники
ОБЯЗАТЕЛЬНО ДЕТЕКТИРУЕМЫЕ ПЕРЕХОДНЫЕ МЕТАЛЛЫ					
Железо (Fe)	1–15 мг/кг с.в.	5–50 мг/кг с.в.	10–360 мг/кг с.в.	*Основной переходный металл*. Концентрируется в мелассе. Определяется методами ААС, ИСП-ОЭС, колориметрически. Часто связан с органическими комплексами и коллоидами.	[11,37]
Цинк (Zn)	0,1–2 мг/кг с.в.	0,5–5 мг/кг с.в.	1–11 мг/кг с.в.	Важный микроэлемент. Концентрация растет на поздних стадиях. Для точного определения в мелассе часто требуется минерализация пробы (кислотное разложение).	[11,38]
Медь (Cu)	0,05–1 мг/кг с.в.	0,1–3 мг/кг с.в.	0,5–7 мг/кг с.в.	Аналогично цинку, требует тщательной пробоподготовки для разрушения органических комплексов. Определяется методами ААС, ИСП-ОЭС.	[25,37]
Марганец (Mn)	0,1–5 мг/кг с.в.	0,5–10 мг/кг с.в.	1–50 мг/кг с.в.	Легко детектируемый элемент. Концентрируется в мелассе. Определяется методами ААС, ИСП-ОЭС.	[25,37]
Хром (Cr)	< 0,01–0,1 мг/кг с.в.	< 0,05–0,5 мг/кг с.в.	0,1–2 мг/кг с.в.	Может присутствовать в следовых количествах. Контролируется как потенциально токсичный элемент. Определяется высокочувствительными методами (ИСП-МС, графитовая печь ААС).	[37]
ПОТЕНЦИАЛЬНО ТЯЖЕЛЫЕ МЕТАЛЛЫ / ЗАГРЯЗНИТЕЛИ					
Свинец (Pb)	< 0,005–0,02 мг/кг с.в.	< 0,01–0,05 мг/кг с.в.	< 0,02–0,2 мг/кг с.в. (~20 мкг/кг)	*Ключевой токсикант*. Присутствие обусловлено экологическим фоном. Определяется в виде следов методами высокой чувствительности (ИСП-МС, ААС с графитовой печью). Требует контроля по нормативам.	[37]
Кадмий (Cd)	< 0,001–0,005 мг/кг с.в.	< 0,002–0,01 мг/кг с.в.	< 0,005–0,05 мг/кг с.в. (~3,5 мкг/кг)	*Высокотоксичный элемент*. Уровни крайне низкие, но подлежат обязательному мониторингу. Анализ требует высокочувствительной аппаратуры (ИСП-МС).	[37]
Никель (Ni)	< 0,05–0,5 мг/кг с.в.	0,1–1 мг/кг с.в.	0,5–5 мг/кг с.в.	Может относиться как к переходным, так и к контролируемым токсичным элементам. Концентрируется в мелассе.	[37]
Мышьяк (As)	< 0,001–0,01 мг/кг с.в.	< 0,005–0,02 мг/кг с.в.	< 0,01–0,05 мг/кг с.в.	Токсичный металлоид. Определяется в следовых количествах методами ИСП-МС или атомной флуоресценции с гибридизацией.	[37]
ПРОЧИЕ ДЕТЕКТИРУЕМЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ					
Алюминий (Al)	0,5–10 мг/кг с.в.	5–50 мг/кг с.в.	10–200 мг/кг с.в.	Не является тяжелым металлом, но контролируется. Поступление может быть связано с коагулянтами на основе алюминия или с оборудованием.	[37]
Кобальт (Co)	< 0,001–0,01 мг/кг с.в.	< 0,005–0,05 мг/кг с.в.	< 0,01–0,1 мг/кг с.в.	Микроэлемент, определяется в следовых количествах.	[37]
Стронций (Sr)	н/д	н/д	Обнаруживается в золе	Часто указывает на минеральный состав почвы или возможные примеси. Детектируется методами эмиссионной спектроскопии или ИСП-ОЭС в зольном остатке.	[25,40]

Условные обозначения и пояснения:

- с.в. — сухое вещество;
- н/д — нет достаточных данных в литературе для указания типичного диапазона;
- *тренд*: для всех перечисленных металлов наблюдается общая тенденция к концентрированию от сока к мелассе в 2–10 и более раз, так как они не удаляются в процессе очистки и кристаллизации сахарозы [10,25].
- *Спецификация (формы нахождения)*:
  - В соке металлы находятся преимущественно в ионной или слабо связанной форме.
  - В сиропе и особенно в мелассе значительная доля переходных металлов (Fe, Cu, Zn) ассоциирована с органическими комплексами (белки, продукты разложения, меланоидины) и коллоидными частицами [11,39]. Это главная причина трудностей их прямого определения без пробоподготовки.
  - Тяжелые металлы (Pb, Cd) могут присутствовать как в виде свободных ионов, так и в сорбированном состоянии на органических и неорганических коллоидах.
- *Методы детекции*: для рутинного количественного определения используются атомно-абсорбционная спектрометрия (ААС) и индуктивно-связанная плазма с оптико-эмиссионным спектрометром (ИСП-ОЭС) [37,38]. Для анализа следовых количеств Pb, Cd, As необходимы индуктивно-связанная плазма с масс-спектрометрией (ИСП-МС) [37]. Обязательным этапом для мелассы является полная минерализация пробы (мокрое или сухое озоление) для разрушения органической матрицы и высвобождения металлов [11].

Таким образом, минеральный профиль, характеризующийся высоким содержанием калия и комплексом микроэлементов, является ключевым отличием и преимуществом свекловичной мелассы как функционального ингредиента, а его изучение требует учета как общих концентраций, так и химических форм нахождения элементов.

3.3. Органические кислоты, азотистые соединения и витамины

Органические кислоты (муравьиная, уксусная, лимонная, яблочная) присутствуют в обоих продуктах, формируя их вкусо-ароматический профиль и влияя на стабильность. Их общее содержание составляет 1–3 % СВ в сиропе и 2–4 % СВ в мелассе [10]. Среди азотистых соединений особое место занимает бетаин (триметилглицин), содержание которого в мелассе (4–6 % СВ) на порядок выше, чем в сиропе (0,5–1,5 % СВ) [27,41]. Бетаин обладает доказанными гепатопротекторными и осмопротекторными свойствами, что повышает биологическую ценность продукта. Также в составе присутствуют свободные аминокислоты (глутаминовая, аспарагиновая, аланин) и витамины группы В, в особенности пантотеновая (B_5) и никотиновая (РР) кислоты, концентрации которых могут увеличиваться при ферментации мелассы пробиотическими культурами [36,42].

Органические кислоты играют важную роль в формировании вкусовых характеристик и стабильности сиропа. В свекловичном сиропе идентифицированы следующие органические кислоты в процентах от сухого вещества [39]:

- муравьиная кислота: 0,1–1,2 %;
- уксусная кислота: 0,6–1,3 %;
- пропионовая кислота: 0,02–0,3 %;
- масляная кислота: до 0,6 %;
- валериановая кислота: до 0,2 %.

Кроме того, в сиропе присутствуют следовые количества около 20 ароматических кислот [11]. Органические кислоты образуются как в процессе роста свеклы, так и в результате микробиологических и химических процессов при переработке. Лимонная кислота и яблочная кислота также присутствуют в сиропе, хотя их концентрация обычно ниже, чем в мелассе. Эти кислоты участвуют в метаболических процессах растений и переходят в сок при экстракции.

Свекловичная меласса содержит более 10 различных безазотистых органических кислот в суммарном количестве примерно 4 %, которые влияют на ее кислотность, вкусовые характеристики и стабильность. Значение pH мелассы обычно находится в диапазоне 7,2–8,9, что соответствует слабощелочной или близкой к нейтральной реакции [4]. Основные органические кислоты в мелассе с СВ = 75 % в процентах от сухого вещества [11,16,43]:

- молочная кислота: 1,0–1,7 %;
- лимонная, малеиновая, гликолевая: 0,5–1,0 %;
- щавелевая, фумаровая: 0,1–0,2 %;
- аконитовая: 0 %;
- муравьиная кислота: 0–0,2 %;
- уксусная кислота: 0–0,2 %;
- пропионовая кислота: 0–0,2 %;
- масляная кислота: до 0–0,2 %;
- валериановая кислота: следы.

Функциональные свойства органических кислот в мелассе:

- лимонная кислота: важный метаболит цикла Кребса;
- яблочная кислота: участвует в метаболических процессах;
- щавелевая кислота: может образовывать комплексы с кальцием;
- янтарная кислота: образуется в процессе ферментации, ее содержание может увеличиваться в 40–50 раз при культивировании пробиотических микроорганизмов на мелассе [4].

Меласса также содержит следовые количества около 20 ароматических кислот, которые вносят свой вклад в формирование характерного аромата продукта [11].

Азотсодержащие соединения в сиропе сахарной свеклы представлены свободными аминокислотами, пептидами, белками и другими органическими соединениями азота. Общее содержание азотистых веществ составляет 1–2 % от сухого вещества. Около 50–60 % аминокислот переходят в сироп из свеклы [16]. Основными аминокислотами являются:

- глутаминовая кислота: преобладающая аминокислота, присутствует преимущественно (75 %) в форме циклической пирролидинкарбоновой кислоты [4];
- аспарагиновая кислота;
- аланин;
- серин;
- глицин.

Важным азотсодержащим соединением является *бетаин* (триметилглицин), который присутствует в значительных концентрациях (0,5–1,5 % от сухого вещества) [30,39]. Бетаин обладает осмопротекторными свойствами и играет важную роль в метаболизме растений. При разложении бетаина образуются триметиламин и другие летучие амины, придающие продукту характерный запах [4].

Сироп из сахарной свеклы содержит водорастворимые витамины, преимущественно группы В, которые переходят в него из свекловичного сока в процессе переработки. Средняя концентрация витаминов в сиропе (мг на 100 г продукта) составляет [11]:

- биотин (витамин Н): 0,01 мг/100 г;
- тиамин (витамин B_1): 0,3 мг/100 г;
- рибофлавин (витамин B_2): 0,04 мг/100 г;
- пиридоксин (витамин B_6): 0,54 мг/100 г;
- никотиновая кислота (витамин РР): 5,1 мг/100 г;
- пантотеновая кислота (витамин B_5): 8,0 мг/100 г;
- фолиевая кислота (витамин B_9): 0,02 мг/100 г.

Содержание витаминов в сиропе может варьироваться в зависимости от сорта свеклы, условий выращивания и технологических параметров переработки. Витамины группы В играют важную роль в метаболических процессах и повышают биологическую ценность продукта.

Свекловичная меласса содержит значительное количество азотсодержащих соединений, в том числе свободные аминокислоты, пептиды и бетаин. Общее содержание азотистых веществ составляет 2–4 % от сухого вещества [25].

Аминокислотный состав мелассы (мг/л или мг/100 г) включает как незаменимые, так и заменимые аминокислоты.

Незаменимые аминокислоты:

- лизин: 0,62 мг/л (в контрольной мелассе);
- метионин: 2,10 мг/л;
- треонин: 1,50 мг/л;
- валин: 3,50 мг/л;
- лейцин + изолейцин: 14,90 мг/л;
- фенилаланин: 0,31 мг/л;
- гистидин: 5,40 мг/л.
- Заменимые аминокислоты:
- аргинин: 18,30 мг/л;
- тирозин: 0,44 мг/л;
- аланин: 1,50 мг/л;
- глицин: 1,80 мг/л;
- пролин: 2,40 мг/л;
- серин: 4,80 мг/л.

Бетаин (триметилглицин) — одно из наиболее важных азотсодержащих соединений в свекловичной мелассе. Содержание бетаина составляет 4–6 % от сухого вещества (40–60 г/кг) [25,30]. Бетаин обладает рядом биологически важных свойств:

- осмопротекторная функция;
- донор метильных групп в метаболических процессах (трансметилирование);
- гепатопротекторное действие;
- улучшение усвоения питательных веществ;
- потенцирование спортивных результатов (в составе специализированного питания).

При разложении бетаина образуются триметиламин и другие летучие амины, которые придают мелассе характерный запах [11,16]. Бетаин — уникальный компонент свекловичной мелассы, который отличает ее от тростниковой мелассы и придает ей особую функциональную ценность.

Свекловичная меласса является ценным источником водорастворимых витаминов, преимущественно группы В. Средние концентрации витаминов в мелассе (мг на 100 г продукта) составляют [2]:

- биотин (витамин Н): 0,01 мг/100 г;
- тиамин (витамин B_1): 0,3 мг/100 г;
- рибофлавин (витамин B_2): 0,04 мг/100 г;
- пиридоксин (витамин B_6): 0,54 мг/100 г;
- никотиновая кислота (витамин РР): 5,1 мг/100 г;
- пантотеновая кислота (витамин B_5): 8,0 мг/100 г;
- фолиевая кислота (витамин B_9): 0,02 мг/100 г.

Витамины группы В в мелассе находятся в биодоступной форме и могут эффективно усваиваться организмом. Особенно высоко содержание пантотеновой кислоты (8,0 мг/100 г) и никотиновой кислоты (5,1 мг/100 г), что делает мелассу ценным источником этих витаминов. При ферментации мелассы пробиотическими микроорганизмами содержание витаминов группы В может значительно увеличиться, что используется для производства биологически активных добавок [15].

4. Сравнительный анализ и пищевая ценность

Сводные сравнительные данные сиропа и мелассы по основным компонентам представлены в Таблице 3. Качественное отличие свекловичной мелассы заключается в высокой концентрации несахаров,

Таблица 3. **Сравнительный химический состав сиропа из сахарной свеклы и свекловичной мелассы (в % от сухого вещества)**
Table 3. **Comparative chemical composition of sugar beet syrup and beet molasses (in % of dry matter)**

Компонент	Сахарный сироп	Свекловичная меласса	Примечание	Источники
Сухие вещества	60–70 %	75–85 %	Определяет физическое состояние и стабильность	[16,18]
Сахароза	55–65 %	45–52 %	Основной углевод, источник энергии	[12,13,17]
Инвертные сахара	1–2 %	< 1 %	Характерное отличие от тростниковой мелассы	[25,32]
Раффиноза	0,5–1,5 %	1–2 %	Олигосахарид, влияет на вязкость и кристаллизацию, пребиотик	[31,33]
Минеральные в-ва (зола)	2–4 %	7–12 %	*Ключевое различие.* Меласса — концентрированный источник минералов	[10,30]
Калий (K)	1,5–3,0 %	3,5–5,5 %	Преобладающий катион, критически важен для физиологии человека и животных	[12,13]
Натрий (Na)	0,5–1,5 %	0,8-2,0 %		[12,13]
Азотистые вещества	1–2 %	2–4 %	Включая аминокислоты, пептиды, бетаин	[4,25]
Бетаин	0,5–1,5 %	4–6 %	*Уникальный компонент свекловичной мелассы.* Цвиттер-ион, гепатопротектор, осмопротектор	[30,41,44]
Органические кислоты	1–3 %	2–4 %	Лимонная, уксусная, янтарная и др. Формируют вкус и аромат, влияют на pH	[4,10]
pH	7,5–8,5 ед	7,2–8,9 ед	Слабощелочная реакция среды	[2]
Витамины группы B	Присутствуют	Присутствуют	Особенно высоко содержание B_5 (пантотеновая) и PP (никотиновая) в мелассе	[2]

включая минералы, бетаин и коллоидные вещества (меланоидины), что, с одной стороны, снижает ее чистоту с точки зрения сахарного производства, а с другой — повышает функциональную ценность. Энергетическая ценность продуктов составляет 250–300 ккал/100 г и обусловлена в основном легкоусвояемой сахарозой, усвояемость которой в свекловичной мелассе достигает 98,5 % [32].

Качественное отличие мелассы заключается в резко возросшей доле неионных и высокомолекулярных органических соединений [39]. Помимо количественного увеличения ионной силы раствора, в мелассе концентрируются:

- Биополимеры и коллоиды: меланоидины, продукты карамелизации, полифенольные комплексы, молекулярная масса которых может достигать десятков и сотен кДа [11,35]. Эти соединения электронейтральны, обладают антиоксидантной активностью и придают мелассе характерный темный цвет.
- Цвиттер-ионы: бетаин и аминокислоты в изоэлектрической точке существуют в форме цвиттер-ионов, чей перенос в электрическом поле крайне неэффективен [4,25].
- Высокомолекулярные углеводы: раффиноза (1–2 % от СВ) и возможные декстраны повышают вязкость раствора [11,31].

Таким образом, снижение эффективности электродиализа с 75 % для сиропа до 40 % для мелассы — это закономерный результат перехода от очистки раствора с преобладанием подвижных минеральных ионов к обработке сложной коллоидной системы. В этой системе доля электродиализуемых ионов относительно общей массы несахаров снижена, а их подвижность ограничена высокой вязкостью, экранированием зарядов в условиях высокой ионной силы и активным обрастанием мембран высокомолекулярными компонентами.

Пищевая и биологическая ценность сиропа и мелассы из сахарной свеклы определяется их богатым химическим составом. Энергетическая ценность обоих продуктов высока и обусловлена легкоусвояемыми углеводами: сироп — 280–300 ккал/100 г, меласса — 250–280 ккал/100 г. Усвояемость сахаров в свекловичной мелассе составляет 98,5 %, что выше, чем в тростниковой (94,5 %) [12,45,46].

Минеральная ценность свекловичной мелассы особенно высока. Калий (3,5–5, % СВ) необходим для регуляции водно-электролитного баланса и работы сердечно-сосудистой системы. Железо (50–200 мг/кг) способствует профилактике анемии. Кальций и магний важны для костной ткани и нервной системы.

Витаминная ценность определяется высоким содержанием витаминов группы B, особенно пантотеновой (8,0 мг/100 г) и никотиновой (5,1 мг/100 г) кислот.

Биологически активные соединения: бетаин (4–6 % в мелассе) обладает гепатопротекторным, осморегуляторным действием, является донором метильных групп [47]. Аминокислоты и органические кислоты повышают общую биологическую ценность и могут обладать антиоксидантными свойствами.

Сравнение свекловичной мелассы с тростниковой мелассой выявляет принципиальные различия (Таблица 4): последняя содержит значительное количество инвертных сахаров (15–25 %), но не содержит бетаина, а также имеет иной минеральный профиль (например, выше содержание сульфатов и фосфатов) и, как правило, более высокую антиоксидантную активность, связанную с фенольными соединениями тростника [32,48]. Это определяет дифференцированное применение продуктов: свекловичная меласса более предпочтительна как источник бетаина и минералов (особенно калия), в то время как тростниковая может быть выбрана из-за своих антиоксидантных, сенсорных свойств и более выраженного карамельного вкуса.

Таблица 4. **Состав меласс сахарного производства [34]**
Table 4. **Composition of sugar production molasses [34]**

Компонент (% СВ)	Свекловичная меласса			Тростниковая меласса		
	1	2	3	1	2	3
Сухие вещества	76,7	79,4	78,4	76,6	78,5	76,7
Сырой протеин	12,8	14,6	12,5	7,7	8,8	6,0
Фракция сахара						
Сахароза	66,1	60,3	60,4	49,3	55,2	43,5
Глюкоза	0,02	0,05	0,15	5,97	1,99	5,74
Фруктоза	0,05	0,12	0,28	10,02	5,03	7,9
Раффиноза	2,18	0,28	0,2	0,03	0,02	0,03
Галактоза	0,03	0,03	0,03	0,04	0,04	0,04
Арабиноза	–	0,02	0,03	0,02	–	0,01
Ксилоза	0,01	–	–	–	–	–
Полисахариды						
Крахмал	0,09	0,03	0,1	0,54	0,18	0,32
Леван	0,5	0,67	0,41	0,81	0,83	1,21
Декстран	0,07	0,09	0,06	0,63	1,42	0,31
Арабан	0,03	0,05	0,05	0,15	0,25	0,19
Органические кислоты						
Аконитовая кислота	–	–	–	0,37	1,25	3,78
Молочная кислота	3,34	3,67	6,91	3,34	6,43	12,8
Яблочная кислота	0,02	0,11	0,13	0,03	0,11	0,21
Лимонная кислота	0,39	0,38	0,15	0,08	0,13	0,19
Пироугольная кислота	3,1	2,96	2,59	0,18	0,29	0,2
Щавелевая кислота	0,04	0,04	0,03	0,05	0,05	0,04
Гликолевая кислота	0,22	0,26	0,23	–	–	–
Уксусная кислота	0,59	0,28	0,49	0,23	0,29	0,2
Зола	10,3	11,9	13,3	12,9	12,8	12,2
Ca	1,24	0,06	0,54	1,43	1,3	1,55
Mg	0,03	0,02	0,02	0,57	0,33	0,58
Na	0,32	1,06	0,36	0,01	0,02	0,03
K	2,39	4,93	1,07	0,5	1,37	2,17
Сульфаты	0,17	0,4	0,38	1,69	2,89	1,93
Сера	0,06	0,13	0,13	0,56	0,96	0,64
Фосфаты	0,58	1,23	1,33	2,72	2,55	2,45
Нитраты (мг/кг)	35	36	18	211	784	688
Хлориды (мг/кг)	4450	797	5610	14	39	0,5
DCAD[1] (meq/100 g)	47	129	18	–17	–20	13

Примечание: значения выражаются как % СВ, если не указано иное.
[1] Разность диетических катион-анионов, рассчитанная как: DCAD (dietary cation-anion difference), meq/100 g = ((K, % DM/0.039 + Na, % DM/0.023) – (Cl, % DM/0.0355 + S, % DM/0.016)); meq/100 g = миллиэквивалентов на 100 г.

5. Влияние состава на функционально-технологические свойства

Химический состав сиропа и мелассы напрямую определяет их поведение в технологических процессах.

Вязкость мелассы значительно выше, чем у сиропа, что связано не только с большей концентрацией сухих веществ, но и с наличием высокомолекулярных соединений (раффиноза, декстраны, меланоидины) [16,25,33]. Это необходимо учитывать при транспортировке, хранении и дозировании. Высокая вязкость мелассы обусловлена присутствием коллоидных веществ и продуктов реакции Майяра, которые образуются в процессе тепловой обработки свекловичного сока [11,39].

Гигроскопичность обоих продуктов высока из-за содержания сахарозы и минеральных солей, что требует особых условий упаковки и хранения для предотвращения комкования [16]. Однако наличие минералов в мелассе может несколько снижать ее гигроскопичность по сравнению с чистым сахарным сиропом [25].

Цветообразование является ключевым различием. Сироп имеет светло-желтый цвет, в то время как меласса — темно-коричневый, почти черный. Это обусловлено концентрированием в мелассе продуктов реакций Майяра и карамелизации (меланоидинов), которые образуются в ходе тепловой обработки при переработке [11,39]. Эти соединения не только дают цвет, но и обладают антиоксидантной активностью и специфическим вкусом [49]. Интенсивность окраски мелассы коррелирует с содержанием меланоидинов и продуктов карамелизации, концентрация которых возрастает в процессе многократного уваривания утфелей [16].

Пенообразующая и эмульгирующая способность мелассы выше, чем у сиропа, благодаря присутствию поверхностно-активных веществ, таких как сапонины (присутствующие в свекле) и коллоидные белки [25,39]. Это свойство может быть полезно в хлебопечении и производстве некоторых кондитерских изделий [19].

Буферная емкость мелассы, обусловленная смесью органических кислот и их солей, выше, чем у сиропа [10,43]. Это делает ее хорошим стабилизатором pH в ферментационных средах и некоторых пищевых системах [4,15]. Наличие органических кислот, таких как молочная, лимонная и уксусная, обеспечивает способность мелассы поддерживать pH в заданном диапазоне при добавлении кислот или щелочей [16].

Антиоксидантная активность мелассы обусловлена наличием меланоидинов, фенольных соединений и продуктов карамелизации [11,49]. Это свойство может быть использовано для замедления окислительных процессов в пищевых продуктах при использовании мелассы в качестве ингредиента [49].

Таким образом, знание химического состава сиропа и мелассы позволяет прогнозировать их поведение в различных технологических процессах и обоснованно выбирать направления использования в зависимости от требуемых функционально-технологических свойств готового продукта.

6. Методы анализа химического состава

Точное определение химического состава сиропа и мелассы из сахарной свеклы требует применения современных аналитических методов [28]. В настоящее время используется широкий спектр инструментальных и химических методов анализа.

6.1. Хроматографические методы

Высокоэффективная жидкостная хроматография (ВЭЖХ) является одним из наиболее распространенных методов анализа углеводного состава свекловичных продуктов [30,31,35]. Для определения сахаров используются аминные (NH_2) колонки или колонки на основе силикагеля с рефрактометрическим (RI) или испарительным светорассеивающим детектором (ELSD). Подвижная фаза — ацетонитрил-вода. Метод позволяет одновременно определять сахарозу, глюкозу, фруктозу и раффинозу [50] за 15–30 минут с высокой точностью (RSD < 2 %).

Метод ВЭЖХ позволяет одновременно определять несколько сахаров в одной пробе и обеспечивает высокую точность и воспроизводимость результатов [35,51]. Сравнение результатов ВЭЖХ с классическим методом Лейна-Эйнона показывает хорошую корреляцию [30].

Ионная хроматография (IC) с импульсным амперометрическим детектированием (PAD) также широко используется для анализа сахаров в мелассе [36]. Метод отличается высокой чувствительностью и селективностью, принят AOAC International как официальный.

Газовая хроматография с масс-спектрометрией (ГХ–МС) применяется для анализа летучих органических соединений, включая органические кислоты и ароматические компоненты [48].

6.2. Спектроскопические методы

Ближняя инфракрасная спектроскопия (БИК, NIR) используется для быстрого (1–2 мин) оперативного контроля в производственных условиях, позволяя одновременно определять содержание сахаров, влаги, золы [42,52–55]. Требует предварительной калибровки по референсным методам.

Атомно-абсорбционная спектроскопия (ААС) и индуктивно-связанная плазменная спектрометрия (ICP-OES, ICP-MS) являются основными для определения минерального состава [11,37,38,56]. ICP-методы обладают высокой чувствительностью и позволяют проводить многоэлементный анализ (одновременно до 70 элементов) с высокой точностью.

6.3. Электрофоретические методы

Капиллярный электрофорез (КЭ) применяется для определения аминокислот, витаминов и органических кислот в мелассе [28]. Метод отличается высокой разрешающей способностью и малым объемом пробы (нанолитры), а также быстротой анализа (10–30 мин). Имеется возможность одновременного определения различных классов соединений.

Метод капиллярного электрофореза на приборе «Капель» (производства компании «Люмэкс») используется для определения содержания аминокислот, витаминов и органических кислот в свекловичной мелассе [4].

6.4. Классические и специализированные методы

- Метод Лейна-Эйнона — титриметрический метод для определения редуцирующих сахаров, основанный на восстановлении меди в щелочном растворе;
- поляриметрия — оптический метод для определения содержания сахарозы по углу вращения плоскости поляризации;
- титриметрия — для определения общей кислотности (титруемой) и щелочности продуктов;
- ферментативные методы — для специфического определения отдельных сахаров (например, глюкозы) с использованием фермент-субстратных реакций;
- микробиологические методы — для оценки усвояемости сахаров *in vitro* [34], а также для оценки ферментативных свойств субстратов.

7. Инновационные применения свекловичной мелассы

Свекловичная меласса, побочный продукт сахарного производства, благодаря своему богатому составу сахаров, минералов и биологически активных соединений, приобретает все большую значимость в различных отраслях промышленности. Ее инновационное использование охватывает не только традиционное применение в качестве кормовой добавки или сырья для получения сахара, но и многофункциональное использование в пищевой, биотехнологической, химической и даже агротехнической сферах. Универсальность мелассы как субстрата открывает возможности для создания продуктов с высокой добавленной стоимостью, что повышает экономическую эффективность свеклосахарных производств.

7.1. Пищевые применения

В пищевой промышленности свекловичная меласса выступает ценным ингредиентом благодаря своим питательным и функциональным свойствам. Она используется как натуральный подсластитель в кондитерских изделиях, компонент хлебобулочной продукции [57], а также источник минералов и витаминов в функциональных пищевых продуктах [19,32,58–60]. Свекловичная меласса оказалась превосходной осмотической средой для осмотической дегидратации различных образцов пищевых продуктов (фруктов, овощей, мяса и рыбы) с точки зрения снижения содержания воды и значения показателя активности воды a_w [57,61]. Осмотическая дегидратация мелассы приводит к увеличению содержания важных минералов как в растительном, так и в животном сырье, улучшая его функциональные свойства. Меласса улучшает вкусовые и сенсорные характеристики продуктов, снижает потребление сахарозы и обогащает пищевые продукты полезными соединениями, такими как бетаин, который отсутствует в тростниковой и других видах мелассы и представляет особую ценность [62]. Меласса является источником антиоксидантов [49]. Однако для пищевого применения требуется глубокая очистка мелассы от нежелательных примесей, таких как зола, нитраты, сернистый ангидрид и оксиметилфурфурол, чтобы соответствовать строгим стандартам безопасности пищевой продукции [62,63].

7.2. Биотехнологические процессы

Меласса служит эффективным субстратом в различных биотехнологических процессах. Она используется для производства биоэтанола второго поколения [9,64–67], в том числе в комбинации

с дистилляционной бардой для повышения выхода и устойчивости процесса [68]. Кроме того, на основе мелассы получают альфа-галактозидазу и этанол с помощью дрожжей *Saccharomyces cerevisiae* в двухэтапной системе, что снижает затраты и поддерживает экономику замкнутого цикла [69]. Также меласса выступает сырьем для микробиологического синтеза ценных соединений, таких как L-лизин с использованием модифицированной кишечной палочки [70] и ароматического спирта 2-фенилэтанола с помощью дрожжей *Yarrowia lipolytica* [71]. В биотехнологии меласса также применяется для получения пробиотиков, метабиотиков, фруктоолигосахаридов [72] и микробных биополимеров-экзополисахаридов [73], например, поли(3-гидроксибутирата) (ПГБ) с использованием бактерии *Cupriavidus necator* [74], а также для производства молочной [75,76] и лимонной кислоты [77]. Разработан прямой синтез изомальтулозы из свекловичной мелассы с помощью иммобилизованной сахарозоизомеразы [78].

7.3. Экстракция ценных соединений

Инновационные методы экстракции позволяют выделять из мелассы биологически активные соединения с высокой эффективностью. Так, для извлечения бетаина разработан экологичный метод экстракции [79] при температуре помутнения (CPE) с использованием полиэтиленгликоля (PEG), обеспечивающий эффективность до 88 % [80]. Бетаин может использоваться как ценная добавка в корма для скота или как функциональный ингредиент в пищевых продуктах. Для экстракции других биологически активных веществ, таких как фенолы и флавоноиды, применяются оптимизированные методы микроволновой (MAE) и ультразвуковой (UAE) экстракции, причем MAE демонстрирует более высокую эффективность [81].

7.4. Технологические инновации в очистке и переработке

Ключевым направлением инноваций является разработка эффективных технологий очистки технической свекловичной мелассы до уровня пищевого продукта. Одной из таких технологий является супербарботаж — инновационная аддитивная технология, сочетающая барботаж горячим воздухом для удаления сернистого ангидрида и взвешенных частиц. Последующая мембранная фильтрация (микро-, ультра- и нанофильтрация) на керамических мембранах позволяет выделять целевые компоненты — сахарозу и бетаин [62]. Данная технология позволяет получать пищевую свекловичную мелассу с повышенным содержанием бетаина (2–10 %), а также производить улучшитель почвы пролонгированного действия из отходов очистки. По сравнению с традиционными методами дешугаризации (известковая, баритовая, ионообменная сепарация, электродиализ), супербарботаж отличается более высокой производительностью, низкими эксплуатационными расходами и возможностью интеграции в существующую технологическую цепочку сахарного завода [63].

7.5. Агротехническое применение

Помимо промышленного использования, меласса находит применение в сельском хозяйстве в качестве удобрения и улучшителя почвы [82,83]. Она способна изменять соотношение C: N, положительно влиять на микробную экосистему почвы, подавлять растительных паразитических нематод и восстанавливать биологическую активность деградированных почв [84,85]. Концентрированный фильтрационный осадок, полученный в процессе очистки мелассы по технологии супербарботаж, также может использоваться как пролонгированное азотно-фосфорное удобрение, содержащее карбонат кальция для улучшения структуры почвы [63].

Таким образом, инновационные применения свекловичной мелассы демонстрируют ее высокий потенциал как многофункционального и экономически эффективного сырья. Наиболее перспективными направлениями являются производство обогащенной бетаином пищевой мелассы, биотехнологический синтез ценных соединений и разработка комплексных технологий глубокой очистки, таких как супербарботаж. Дальнейшие исследования должны быть направлены на оптимизацию процессов экстракции и ферментации, обеспечение масштабируемости и повышение экономической целесообразности данных инноваций для их широкого внедрения в промышленность.

8. Заключение и перспективы

Сироп и меласса из сахарной свеклы представляют собой не просто побочные продукты сахарного производства, а ценные многокомпонентные сырьевые ресурсы с высоким потенциалом для создания продуктов с добавленной стоимостью. Их сложный химический состав, включающий, помимо сахарозы, значительные количества минеральных веществ (особенно калия), витаминов группы B, уникального бетаина и органических кислот, обуславливает высокую пищевую и биологическую ценность.

Перспективы применения этих продуктов выходят далеко за рамки традиционного использования в кормлении или как субстрата для брожения. Они могут служить основой для создания функциональных пищевых ингредиентов: натуральных минерализованных подсластителей, источников бетаина для специализированного и спортивного питания, обогатителей витаминного профиля хлебобулочных, молочных и мясных продуктов. В биотехнологии меласса является оптимальной экономичной средой для культивирования пробиотиков с повышенной метаболической активностью и производства широкого спектра биопродуктов (кислот, ферментов, биополимеров).

Для реализации этого потенциала необходимы дальнейшие исследования, направленные на следующие решения:

- стандартизацию состава в зависимости от сорта свеклы, региона выращивания и технологии переработки, что позволит гарантировать стабильность свойств для производителей функциональных продуктов;
- разработку эффективных и экологичных методов фракционирования и концентрирования целевых биокомпонентов, таких как бетаин, раффиноза, калийные соли, с использованием мембранных, хроматографических и экстракционных технологий;
- глубокое изучение синергетического эффекта компонентов сиропа и мелассы в составе комплексных пищевых систем, их влияния на текстуру, стабильность и сенсорные характеристики готовых продуктов;
- оценку экономической эффективности и разработку нормативной базы для широкого использования свекловичных продуктов в качестве функциональных ингредиентов в пищевой промышленности и фармацевтике.

Таким образом, углубленное изучение и комплексное использование сиропа и мелассы из сахарной свеклы соответствует принципам биоэкономики и устойчивого развития, позволяя трансформировать отходы традиционной индустрии в ресурсы для инновационных отраслей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / REFERENCES

1. Babu, A. S., Adeyeye, S. A. O. (2024). Extraction of sugar from sugar beets and cane sugar. Chapter in a book: Extraction processes in the food industry. Woodhead Publishing, 2024. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819516-1.00007-7
2. Görgülü, A. (2025). Elevating sugar beet by-products into healthier, natural, and functional ingredients. *Exploration of Foods and Foodomics,* 3, Article 101074. https://doi.org/10.37349/eff.2025.101074
3. Turkish food composition database. (2025). National food composition database. Ministry of Agriculture and Forestry of the Republic of Turkey. Retrieved from https://turkomp.tarimorman.gov.tr/food-pancar-seker-280 Accessed January 10, 2025.
4. Popov, V. S., Vorobyeva, N. V., Svazlyan, G. A., Naumov, N. M., Gryaznova, O. A. (2020). Overview of metabiotics and probiotic cultures during fermentation of molasses. *Systematic Reviews in Pharmacy,* 11(9), 813–817. https://doi.org/10.18411/srp-09-2020-115
5. Pérez-Sánchez, A., González-Ibarra, N., Segura-Silva, R. M., Alcalá-Galiano-Morell, D. D. (2025). Composición química, pretratamiento, almacenamiento, esterilización y usos de la melaza como sustrato en fermentaciones: Una revisión global. *Horizon Nexus Journal,* 3(2), 36–89. [Pérez-Sánchez, A., González-Ibarra, N., Segura-Silva, R. M., Alcalá-Galiano-Morell, D. D. (2025). Chemical composition, pretreatment, storage, sterilisation and uses of molasses as a substrate in fermentations: A global review. *Horizon Nexus Journal,* 3(2), 36–89. (In Spanish)] https://doi.org/10.70881/hnj/v3/n2/59
6. Ghazi, I., Fernández-Arrojo, L., De Segura, A. G., Alcalde, M., Plou, F. J., Ballesteros, A. O. (2006). Beet sugar syrup and molasses as low-cost feedstock for the enzymatic production of fructo-oligosaccharides. *Journal of Agricultural and Food Chemistry,* 54(8), 2964–2968. https://doi.org/10.1021/jf053023b
7. Niknezhad, S. V., Kianpour, S., Jafarzadeh, S., Alishahi, M., Darzi, G. N., Morowvat, M. H, (2022). Biosynthesis of exopolysaccharide from waste molasses using *Pantoea* sp. BCCS 001 GH: A kinetic and optimization study. *Scientific Reports,* 12(1), Article 10489. https://doi.org/10.1038/s41598-022-14417-1
8. Кульнева, Н. Г., Путилина Л. Н., Лазутина Н. А. (2019). Ресурсосберегающая технология переработки сахарной свеклы. *Сахарная свекла*, 10, 32–36. [Kulneva, N. G., Putilina, L. N., Lazutina, N. A. (2019). Resource-saving technology of sugar beet processing. *Sugar Beet*, 10, 32–36. (In Russian)] https://doi.org/10.25802/sb.2019.28.41.006
9. Kumar, S., Lata, P., Dogra, A., Kumar, R., Tiwari, A. K., Vasudeva, A. et al. (2026). Revolutionizing waste valorization: Chemical transformations for unlocking the potential of food and agro-industrial by-products. Chapter in a book: Food and Agro-Industrial Wastes. Sustainable Impacts, Transformation and Added Value of By-products. Academic Press, 2026. https://doi.org/10.1016/B978-0-443-31654-8.00021-7
10. Belyaeva, L. I., Pruzhin, M. K., Puzanova, L. N., Ostapenko, A. V., Sysoeva, T. I. (2024). Quality analysis of sugar beet molasses based on the evidence of reference values of indicators. *Russian Agricultural Sciences,* 50(6), 814–820. https://doi.org/10.3103/S106836742570020X

11. Valli, V., Caravaca, A. M. G., Di Nunzio, M., Danesi, F., Caboni, M. F., Bordoni, A. (2012). Sugar cane and sugar beet molasses, antioxidant-rich alternatives to refined sugar. *Journal of Agricultural and Food Chemistry,* 60(51), 12508–12515. https://doi.org/10.1021/jf304416d
12. Steg, A., van der Meer, J. M. (1985). Differences in chemical composition and digestibility of beet and cane molasses. *Animal Feed Science and Technology,* 13(1–2), 83–91. https://doi.org/10.1016/0377-8401(85)90044-6
13. Palmonari, A., Cavallini, D., Sniffen, C. J., Fernandes, L., Holder, P., Fagioli, L. (2020). Short communication: Characterization of molasses chemical composition. *Journal of Dairy Science,* 103(7), 6244–6249. https://doi.org/10.3168/jds.2019-17644
14. Stark, J. B., McCready, R. M. (1968). The relation of beet molasses composition to true purity: Part 1. Composition. *Journal of the American Society of Sugar Beet Technologists,* 15(1), 61–72. https://doi.org/10.5274/JSBR.15.1.61
15. Popov, V., Svazlyan, G. (May 28–29, 2021). *Concept and principles of development of a new generation symbiotic preparation*. International Scientific-Practical Conference "Agriculture and Food Security: Technology, Innovation, Markets, Human Resources" (FIES 2021). Kazan, Russia, 2021. https://doi.org/10.1051/bioconf/20213700127
16. Van der Poel, P. W., Schiweck, H., Schwartz, T. (1998). Sugar technology: Beet and cane sugar manufacture. Verlag Dr. Albert Bartens KG, 1998.
17. Bubník, Z., Henke, S., Kadlec, P., Hinková, A., Pour, V. (2006). Database of the properties of sucrose, sucrose solution and food. *Journal of Food Engineering,* 77(3), 399–405. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.07.004
18. Bubník, Z., Kadlec, P., Urban, D., Bruhns, M. (1995). Sugar technologists manual: Chemical and physical data for sugar manufacturers and users. Verlag Dr. Albert Bartens KG, 1995.
19. Кижова, Ю. П., Деяк, О. С. (2021). Використання бурякового сиропу в технології кетчупів — шляхдо здорового харчування. *Продовольчий Вісник,* 9(16), 109–116. [Kryzhova, Yu., Deyak, O. (2021). Use of beet syrup in ketchup technology — the way to healthy nutrition. *Food Resources*, 9(16), 109–116. (In Ukrainian)] https://doi.org/10.31073/FoodResources2021-16-11
20. Tuzhilkin, V. I., Balykhin, M. G., Petrov, S. M., Podgornova, N. M., Lukin, N. D., Kovalyonok, V. A. (2021). Mathematical description of the isobaric vaporizing crystallization of sucrose. *Journal of Food Engineering,* 306(1040), Article 110614. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2021.110614
21. Tuzhilkin, V. I., Petrov, S. M., Podgornova, N. M., Lukin, N. D. (2024). Process engineering of semi-continuous boiling of massecuites based on Digital Twin of sucrose crystallization. *Journal of Food Engineering,* 365, Article 111816. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2023.111816
22. Lu, G., Meng, Y., Huang, J. (2025). A novel control method of sugar boiling based on model-free adaptive control and neural networks. *Journal of Food Science,* 90(11), Article e70662. https://doi.org/10.1111/1750-3841.70662
23. Soleymani, M., Hakimzadeh, V., Noghabi, M. S., Arianfar, A. (2024). Investigating the potential of bubbling and ultrasonic processes in reducing the fouling of the ultrafiltration membrane during the purification of raw sugar beet syrup [Preprint]. *Research Square*. https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-4162709/v1
24. Тужилкин В. И., Петров С. М., Подгорнова, Н. М. (2023). Химико-термодинамические свойства чистых и многокомпонентных растворов сахарозы. Техника и технология пищевых производств, 53(4), 742–753. [Tuzhilkin, V. I., Petrov, S. M., Podgornova, N. M. (2023). Chemical and thermodynamic properties of pure and multicomponent sucrose solutions. *Food Processing: Techniques and Technology,* 53(4), 742–753. (In Russian)] https://doi.org/10.21603/2074-9414-2023-4-2474
25. Adbhai, A. R., Dewanjee, S., Patel, K.G., Karmakar, N. (2022). Sugar beet molasses production and utilization. Chapter in a book: Sugar beet cultivation, management and processing. Springer, Singapore, 2022. https://doi.org/10.1007/978-981-19-2730-0_44
26. El-Geddawy, M. A. M., Omar, M. B., Seleim, M. A., Elsyiad, S. I. (2014). Composition and properties of Egyptian beet molasses. *Journal of Food and Dairy Sciences,* 3(12), 669–679. https://doi.org/10.21608/jfds.2012.81735
27. Šarić, L. Ć., Filipčev, B. V., Šimurina, O. D., Plavšić, D. V., Šarić, B. M., Lazarević, J. M. et al. (2016). Sugar beet molasses: Properties and applications in osmotic dehydration of fruits and vegetables. *Food and Feed Research*, 43(2), 135–144. https://doi.org/10.5937/FFR1602135S
28. International Commission for Uniform Methods of Sugar Analysis. (2024). ICUMSA methods book. Verlag Dr. Albert Bartens, 2024.
29. Crouse, M. S., Sellers, S., Wawrousek, K., Sabino, R.M. (2025). Biopolymers from sugar beet molasses: Isolation, characterization, and bioactive properties. *ACS Omega,* 10(12), 12002–12013. https://doi.org/10.1021/acsomega.4c09633
30. Rajakylä, E., Paloposki, M. (1983). Determination of sugars (and betaine) in molasses by high-performance liquid chromatography: Comparison of the results with those obtained by the classical Lane-Eynon method. *Journal of Chromatography A,* 282, 595–602. https://doi.org/10.1016/S0021-9673(00)91636-4
31. Xu, W., Liang, L., Zhu, M. (2015). Determination of sugars in molasses by HPLC following solid-phase extraction. *International Journal of Food Properties,* 18(3), 547–557. https://doi.org/10.1080/10942912.2013.837064
32. Sheu, S.-C., Lai, M.-H. (2012). Composition analysis and immuno-modulatory effect of okra (Abelmoschus esculentus L.) extract. *Food Chemistry*, 134(4), 1906–1911. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.03.110
33. Sjölin, M., Thuvander, J., Wallberg, O., Lipnizki, F. (2020). Purification of sucrose in sugar beet molasses by utilizing ceramic nanofiltration and ultrafiltration membranes. *Membranes*, 10(1), Article 5. https://doi.org/10.3390/membranes10010005
34. Palmonari, A., Cavallini, D., Sniffen, C. J., Fernandes, L., Holder, P., Fusaro, I. et al. (2021). *In vitro* evaluation of sugar digestibility in molasses. *Italian Journal of Animal Science,* 20(1), 571–577. https://doi.org/10.1080/1828051X.2021.1899063
35. Damon, C. E., Pettitt, B. C., Jr. (1980). High performance liquid chromatographic determination of fructose, glucose, and sucrose in molasses. *Journal of the Association of Official Analytical Chemists,* 63(3), 476–480. https://doi.org/10.1093/jaoac/63.3.476
36. Schäffler, K. J., Day-Lewis, C. M. J., Clarke, M., Jekot, J., Rearick, E., Tungland, B. et al. (1997). Determination of sugars in beet and cane final molasses by ion chromatography: Collaborative study. *Journal of AOAC International,* 80(3), 603–610. https://doi.org/10.1093/jaoac/80.3.603
37. Vicentini-Polette, C. M., Belé, J. S. A. H., Borges, M. T. M. R., Spoto, M. H. F., Verruma-Bernardi, M. R. (2019). Physicochemical and sensorial characterization of commercial sugarcane syrups. *Revista de Ciências Agrárias,* 42(3), 808–816. https://doi.org/10.19084/rca.17279
38. Vicentini-Polette, C. M., de Souza Gallo, A., do Nascimento e Silva, J. H., de Campos Bernardi, A. C., Borges, M. T. M. R., Verruma-Bernardi, M. R. (2024). Minerals levels in sugarcane syrup. *Food Science and Technology*, 44, Article e00263. https://doi.org/10.5327/fst.00263
39. Герасименко, А. А., Олянская, С. П., Гривцева, Э. А. (1984). Меласса и мелассообразование в свеклосахарном производстве. Киев: Высшая школа, 1984. [Gerasimenko, A. A., Olyanskaya, S. P., Grivtseva, E. A. (1984). Molasses and molasses formation in sugar beet production. Kiev: Vyshaya Shkola, 1984. (In Russian)
40. Lu, G., Huang, J. (2025). A novel detail enhancement method for industrial digital radiography based on multiscale pixel-level adaptive fusion. *Journal of Nondestructive Evaluation,* 44(3), Article 59. https://doi.org/10.1007/s10921-025-01197-7
41. Altinisik, S., Zeidan, H., Yilmaz, M. D., Marti, M. E. (2023). Reactive extraction of betaine from sugarbeet processing byproducts. *ACS Omega,* 8(12), 11029–11038. https://doi.org/10.1021/acsomega.2c07845
42. Schäffler, K. J., de Gaye, M. T. D. (1997). Rapid near infra-red estimation of multicomponents in mixed juice and final molasses: The possibility of day-to-day control of raw sugar factories using NIR. *Proceedings of the Annual Congress — South African Sugar Technologists' Association*, (71), 153–160.
43. De Oliveira Lino, F. S., Basso, T. O., Sommer, M. O. A. (2018). A synthetic medium to simulate sugarcane molasses. *Biotechnology for Biofuels*, 11, Article 221. https://doi.org/10.1186/s13068-018-1221-x
44. Krulj, J., Jevtić-Mučibabić, R., Grbić, J., Brkljača, J., Milovanović, I., Filipčev, B. et al. (2014). Determination of betaine in sugar beet molasses. *Journal on Processing and Energy in Agriculture*, 18(4), 123–126.
45. Cheung, P. C. K., Mehta, B. M. (2025). Handbook of food chemistry. Springer, 2025. https://doi.org/10.1007/978-3-642-41609-5
46. Schiweck, H., Steinle, G. (September 3–4, 1987). Analytical methods of sugar factories — New developments. Proceedings of the Symposium on the Chemistry and Processing of Sugarcane. New Orleans, Louisiana. Elsevier, 1988.
47. Dobrijević, D., Pastor, K., Nastić, N., Özogul, F., Krulj, J., Kokić, B. et al. (2023). Betaine as a functional ingredient: Metabolism, health-promoting attributes, food sources, applications and analysis methods. *Molecules,* 28(12), Article 4824. https://doi.org/10.3390/molecules28124824
48. Kiselev, E. G., Demidenko, A. V., Zhila, N. O., Shishatskaya, E. I., Volova, T. G. (2022). Sugar beet molasses as a potential C-substrate for PHA production by *Cupriavidus necator*. *Bioengineering, 9*(4), Article 154. https://doi.org/10.3390/bioengineering9040154
49. Molina-Cortés, A., Sánchez-Motta, T., Tobar-Tosse, F., Quimbaya, M. (2020). Spectrophotometric estimation of total phenolic content and antioxidant capacity of molasses and vinasses generated from the sugarcane industry. *Waste and Biomass Valorization*, 11, 3453–3463. https://doi.org/10.1007/s12649-019-00690-1
50. Morin-Allory, L., Herbreteau, B., Lafosse, M., Dreux, M. (1990). Automatic sugar analysis in the beet sugar industry: Part II: Apparatus and results. *Journal of High Resolution Chromatography,* 13(5), 343–347. https://doi.org/10.1002/jhrc.1240130510
51. Соколов, М. И., Верзилина, Н. Д., Рудаков, О. Б., Толоконников, В. И., Никульшин, А. П., Полянский, К. К. (2004). Экспресс-анализ сахаров методом высокоэффективной жидкостной хроматографии. *Пищевая промышленность*, 8, 94–95. [Sokolov, M. I., Verzilina, N. D., Rudakov, O. B., Tolokonnikov, V. I., Nikul'shin, A. P., Polyanskii, K. K. (2004). Express analysis of sugars by high performance liquid chromatography. *Food Industry,* 8, 9 4–95. (In Russian)]
52. Aykas, D. P., Sinir, G. O., Borba, K. R. (2023). Determination of quality traits and possible adulteration of molasses using FT-IR spectroscopy: A study from Turkish market. *Food Chemistry,* 427(523), Article 136727. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.136727
53. Rojas-Rioseco, M., Öztop, M., Fuentes, C. A., Bravo, M., Smajlovic, I., Smajlovic, M. et al. (2025). Sustainable authentication of molasses' botanical origin using infrared spectroscopy: Accuracy and greenness evaluation of spectral techniques. *Current Research in Food Science,* 10, Article 101096. https://doi.org/10.1016/j.crfs.2025.101096
54. Walford, S. (June 11–15, 2017). *Near infrared spectroscopy: Rethinking the analysis of sugarcane factory streams*. Proceedings of the 18th International Conference on Near Infrared Spectroscopy. IM Publications Open, Copenhagen, Denmark, 2019. https://doi.org/10.1255/nir2017.129
55. Abi Rizk, H., Estephan, J., Salameh, C., Kassouf, A. (2023). Non-targeted detection of grape molasses adulteration with sugar and apple molasses by mid-infrared spectroscopy coupled to independent components analysis. *Food Additives and Contaminants: Part A*, 40(1), 1–11. https://doi.org/10.1080/19440049.2022.2135766
56. Nakata, H., Tamura, M., Shintani, T., Gomi, K. (2014). Evaluation of baker's yeast strains exhibiting significant growth on Japanese beet molasses and compound analysis of the molasses types. *Journal of Bioscience and Bioengineering,* 117(6), 715–719. https://doi.org/10.1016/j.jbiosc.2013.11.009
57. Lončar, B., Nićetin, M., Filipović, V., Knežević, V., Pezo, L., Šuput, D. et al. (2021). Osmotic dehydration in sugar beet molasses: Food safety and quality benefits. *Journal of Hygienic Engineering and Design,* 34, 15–20.
58. El Asri, O., Farag, M. A. (2023). The potential of molasses from different dietary sources in industrial applications: A source of functional compounds and health attributes, a comprehensive review. *Food Bioscience,* 56, Article 103263. https://doi.org/10.1016/j.fbio.2023.103263
59. Kassa, M. G., Asemu, A. M., Belachew, M. T., Satheesh, N., Abera, B. D., Teferi, D. A. (2024). Review on the application, health usage, and negative effects of molasses. *CyTA — Journal of Food,* 22(1), Article 2321984. https://doi.org/10.1080/19476337.2024.2321984

60. Ghazal, G. A. I., Atallah, A. A. (2016). Production of probiotic yoghurt fortified with bee honey, beet molasses, date honey and pomegranate honey. *Egyptian Journal of Food Science*, 44, 102–117.
61. Šarić, L C., Filipčev, B. V., Simurina, O. D., Plavšić, D. V., Saric, B. M., Lazarević, J. M. et al. (2016). Sugar beet molasses: Properties and application in osmotic dehydration of fruits and vegetables. *Food and Feed Research,* 43(2), 135–144. https://doi.org/10.5937/FFR1602135S
62. Шердани, А. Д. (2021). Инновационная пищевая свекловичная меласса. Новый горизонт рентабельности и экологичности сахарного производства. *Сахар*, 2, 20–23. [Sherdani, A. D. (2021). Innovative food beet molasses. A new horizon of profitability and sustainability of sugar production. *Sugar*, 2, 20–23. (In Russian)] https://doi.org/10.24411/2413-5518-2021-10201
63. Шердани А. Д. (2021). Супербарботаж™ — инновационная технология очистки свекловичной мелассы. Сравнение с современными аналогами. *Сахар*, 5, 24–39. [Sherdani, A. D. (2021). Superbarbotage™ as an innovative technology of beet molasses processing. Comparison with modern analogues. *Sugar*, 5, 24–39. (In Russian)] https://doi.org/10.24412/2413-5518-2021-5-24-39
64. Altınışık, S., Nigiz, F. U., Gürdal, S., Yılmaz, K., Tuncel, N. B., Koyuncu, S. (2025). Optimization of bioethanol production from sugar beet processing by-product molasses using response surface methodology. *Biomass Conversion and Biorefinery,* 15, 9875–9888. https://doi.org/10.1007/s13399-024-05786-w
65. Jamir, L., Kumar, V., Bhasin, J. K., Kumar, S., Singh, H. (2021). Composition, valorization and therapeutical potential of molasses: A critical review. *Environmental Technology Reviews,* 10(1), 131–142. https://doi.org/10.1080/21622515.2021.1892203
66. Kumar, R., Verma, V. C., Mall, A. K., Pathak, A. D. (2022). Bioethanol production from sugar beet juices and molasses for economic and environmental perspectives. Chapter in a book: Sugar beet cultivation, management and processing. Springer, 2022. https://doi.org/10.1007/978-981-19-2730-0_45
67. Osmolak, K., Mikulski, D., Kłosowski, G. (2025). Efficient production of fuel ethanol via the simultaneous use of distillery stillage biomass and beet molasses. *Energies,* 18(2), Article 312. https://doi.org/10.3390/en18020312
68. Mikulski, D., Kłosowski, G. (2022). Integration of first- and second-generation bioethanol production from beet molasses and distillery stillage after dilute sulfuric acid pretreatment. *BioEnergy Research,* 15(1), 454–465. https://doi.org/10.1007/s12155-021-10260-w
69. Álvarez-Cao, M.-E., Cerdán, M.-E., González-Siso, M.-I., Becerra, M. (2019). Bioconversion of beet molasses to alpha-galactosidase and ethanol. *Frontiers in Microbiology,* 10, Article 405. https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.00405
70. He, X., Qi, Y., Chen, K., Li, Y., Ouyang, P. (2016). Enhancing l-lysine production of beet molasses by engineered *Escherichia coli* using an *in situ* pretreatment method. *Applied Biochemistry and Biotechnology,* 179(6), 986–996. https://doi.org/10.1007/s12010-016-2045-4
71. Mitri, S., Louka, N., Rossignol, T., Maroun, R. G., Koubaa, M. (2024). Bioproduction of 2-phenylethanol by *Yarrowia lipolytica* on sugar beet molasses as a low-cost substrate. *Fermentation,* 10(6), Article 290. https://doi.org/10.3390/fermentation10060290
72. Ureta, M. M., Gomez-Zavaglia, A. (2026). Short-chain fructo-oligosaccharides: Alternative substrates and enzymatic sources in their production process. Chapter in a book: Enzymatic Production of Oligosaccharides. Academic Press, 2026. https://doi.org/10.1016/B978-0-443-23730-0.00013-2
73. Baria, D. M., Yagnik, S. M., Panchal, R. R., Rajput, K. N., Raval, V. H. (2025). Sustainable biopolymers: Economic feasibility of microbial exopolysaccharides production. Chapter in a book: Extracellular polysaccharides. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-94472-7_18
74. Ertan, F., Keskinler, B., Tanriseven, A. (2021). Exploration of *Cupriavidus necator* ATCC 25207 for the production of poly(3-hydroxybutyrate) using acid treated beet molasses. *Journal of Polymers and the Environment,* 29(7), 2111–2125. https://doi.org/10.1007/s10924-020-02020-2
75. Kucharska, E. (April 6, 2024). *Applications of beet molasses in fermentation processes: Biotechnological production of lactic acid and its recent applications*. National Scientific Conference "e-Factory of Science". The book of articles. National scientific conferences 2024 Promovendi Foundation. Lodz, Poland, 2024.
76. Непомнящий, А. П., Зубков, И. Н., Сорокоумов, П. Н., Шарова, Н. Ю. (2025). Оптимизация условий культивирования штамма *Lactobacillus acidophilus* для получения молочной кислоты при ферментации мелассы *Известия Вузов. Прикладная химия и биотехнология*, 15(2), 279–285. [Nepomnyashchii, A. P., Zubkov, I. N., Sorokoumov, P. N., Sharova, N. Yu. (2025). Optimization of cultivation conditions for *Lactobacillus acidophilus* to produce lactic acid through molasses fermentation. *Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*, 15(2), 279–285. (In Russian)] https://doi.org/10.21285/achb.979
77. Петров, С. М., Подгорнова, Н. М. (2024). Производство лимонной кислоты из свекловичной мелассы. *Сахар*, 6, 16–22. [Petrov, S. M., Podgornova, N. M. (2024). Production of citric acid from beet molasses. *Sugar*, 6, 16–22. (In Russian)] https://doi.org/10.24412/2413-5518-2024-6-16-22
78. Wang, Q.-Q., Yang, M., Hao, J.-H., Ma, Z.-C. (2021). Direct isomaltulose synthesis from beet molasses by immobilized sucrose isomerase. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology,* 9, Article 691547. https://doi.org/10.3389/fbioe.2021.691547
79. Mohammadzadeh, M., Honarvar, M., Zarei, A. R., Boojar, M.M.A., Bakhoda, H. (2018). A new approach for separation and recovery of betaine from beet molasses based on cloud point extraction technique. *Journal of Food Science and Technology*, 55(4), 1215–1223. https://doi.org/10.1007/s13197-017-2999-4
80. Mohammadzadeh, M., Zarei, A. R., Honarvar, M., Boojar, M. M. A., Bakhoda, H. (2020). A green method for separation of betaine from beet molasses based on cloud point extraction methodology using polyethylene glycol as a food grade surfactant. *Asian Journal of Green Chemistry,* 4(3), 327–339. https://doi.org/10.22034/ajgc.2020.3.9
81. Babaoğlu, A. S., Dilek, N. M., Karakaya, M., Unal, K. (2022). Valorization of sugar beet molasses powder by microwave and ultrasound-assisted extractions of bioactive compounds: An optimization study. *Journal of Food Processing and Preservation,* 46(10), Article e16820. https://doi.org/10.1111/jfpp.16820
82. Abu El-Fotoh, H. M., El-Kalawy, S., El-Sheref, G. F. (2025). Impact of soil applied molasses and foliar spraying with magnesium and boron on sugar beet yield and quality under nitrogen fertilization regime under clay soils. *Menoufia Journal of Soil Science,* 10(10), 171–197. https://doi.org/10.21608/mjss.2025.123456
83. Al-Dhumri, S. A., Al Mosallam, M. S., Zhang, W., Alharbi, S., Abou-Elwafa, S. F. (2023). Application of molasses as an eco-innovative approach substitutes mineral nitrogen fertilization and enhances sugar beet productivity. *Waste and Biomass Valorization,* 14(1), 287–296. https://doi.org/10.1007/s12649-022-01873-z
84. Pyakurel, A., Dahal, B. R., Rijal, S. (2019). Effect of molasses and organic fertilizer in soil fertility and yield of spinach in Khotang, Nepal. *International Journal of Applied Sciences and Biotechnology,* 7(1), 49–53. https://doi.org/10.3126/ijasbt.v7i1.23301
85. Schenck, S. (2001). Molasses soil amendment for crop improvement and nematode management. *Hawaii Agricultural Research Center,* 3, 1–7.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ	AUTHOR INFORMATION
Принадлежность к организации	**Affiliation**
Петров Сергей Михайлович — доктор технических наук, профессор, факультет цифровых технологий, кафедра систем автоматизированного управления, Московский государственный университет технологий и управления имени К. Г. Разумовского (Первый казачий университет) 123007, Москва, пр. 3-й Хорошёвский, д. 1, корп. 3 E-mail: s.petrov@mgutm.ru ORCID: http://orcid.org/0000-0002-5859-7263 * автор для контактов	**Sergey M. Petrov**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Faculty of Digital Technologies, Department of Automated Control Systems, Moscow State University of Technologies and Management named after K. G. Razumovsky (First Cossack University) 1/3, 3rd Khoroshevsky pr., 123007, Moscow, Russia E-mail: s.petrov@mgutm.ru ORCID: http://orcid.org/0000-0002-5859-7263 * corresponding author
Подгорнова Надежда Михайловна — доктор технических наук, профессор, кафедра «Процессы и аппараты химической технологии», Московский политехнический университет 115280, Москва, ул. Автозаводская, д. 16, корп. 4 E-mail: n.m.podgornova@mospolytech.ru ORCID: http://orcid.org/0000-0002-7909-1763	**Nadezhda M. Podgornova**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Chemical Technology Processes and Apparatus, Moscow Polytechnic University 16/4, Avtozavodskaya str., 115280, Moscow, Russia E-mail: n.m.podgornova@mospolytech.ru ORCID: http://orcid.org/0000-0002-7909-1763
Критерии авторства	**Contribution**
Вклад авторов: **С. М. П.**: концептуализация, написание — оригинальный черновик, супервизия. Вклад авторов: **Н. М. П.**: кураторство данных, написание — обзор и редактирование.	Author Contributions: **S. M. P.**: Conceptualization, Writing — Original Draft, Supervision. Author Contributions: **N. M. P.**: Data Curation, Writing — Review and Editing
Конфликт интересов	**Conflict of interest**
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.	The authors declare that there is no conflict of interest.

DOI: https://doi.org/10.21323/2618-9771-2026-9-2-347-356

Поступила 09.10.2025
Поступила после рецензирования 24.06.2026
Принята в печать 26.06.2026
© Бурак Л. Ч., Завалей А. П., Сапач А. Н., 2026

https://www.fsjour.com/jour
Обзорная статья
Открытый доступ

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ БЛОКЧЕЙНА И ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ КОНТРОЛЯ БИОПЛЕНКИ В ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ. ОБЗОР

Бурак Л. Ч. [1]*, Завалей А. П. [2], Сапач А. Н. [1]

[1] Общество с ограниченной ответственностью «БЕЛРОСАКВА», Минск, Республика Беларусь
[2] Совместное общество с ограниченной ответственностью «Ароматик», Дзержинск, Минская область, Республика Беларусь

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:
пищевые продукты, безопасность, биопленка, контроль, интеграция, мониторинг, прослеживаемость, блокчейн, искусственный интеллект

АННОТАЦИЯ

Образование биопленки и ее устойчивость к применяемым традиционным методам очистки и дезинфекции в процессе переработки пищевых продуктов представляют значительную угрозу безопасности и качеству пищевых продуктов. Эти устойчивые микробные сообщества способствуют загрязнению, порче и, как следствие, развитию заболеваний пищевого происхождения, что подчеркивает необходимость инновационных и технологически ориентированных стратегий контроля. Целью данного научного обзора является анализ текущих и потенциальных возможностей применения блокчейна и искусственного интеллекта для мониторинга, контроля и предотвращения образования биопленок, а также определение направлений будущих исследований и практического применения этих технологий в области безопасности пищевых продуктов. Материалом для данного обзора послужили научные публикации 2020–2025 годов. Поиск проводили по ключевым словам в научных базах данных Scopus и Web of Science, Google Scholar и в Научной электронной библиотеке eLIBRARY.ru. Отбор публикаций проводили в два этапа: сначала по названию и аннотации, а затем на основе анализа полнотекстовых статей, соответствующих критериям включения. Анализ научных исследований последних лет показал, что такие современные цифровые технологии, как искусственный интеллект, открывают новые возможности для эффективного управления биопленками. В режиме реального времени блокчейн обеспечивает прослеживаемость санитарного состояния, случаев микробного загрязнения и принятых мер на всех этапах пищевой цепи. Кроме того, машинное обучение и мониторинг на основе датчиков способствуют оперативному контролю микробиологической стабильности, оценке рисков размножения микроорганизмов. В совокупности эти инструменты способствуют принятию решений на основе данных и более активному предотвращению загрязнения. Вместе с тем следует отметить, что интеграция данных требует значительных материальных затрат. Дальнейшие исследования должны быть направлены на совершенствование моделей искусственного интеллекта за счет повышения качества и расширения объема данных, а также на оценку надежности датчиков в промышленных условиях. Не менее важным направлением является изучение нормативно-правовой базы, обеспечивающей баланс между внедрением инноваций и соблюдением требований безопасности.

Received 09.10.2025
Accepted in revised 24.06. 2026
Accepted for publication 26.06.2026
© Burak L. Ch., Zavaley A. P., Sapach A. N. 2026

Available online at https://www.fsjour.com/jour
Review article
Open access

MODERN BLOCKCHAIN AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE TECHNOLOGIES FOR BIOFILM CONTROL IN THE FOOD INDUSTRY. REVIEW

Leonid Ch. Burak[1],* Andrey P. Zavaley[2], Alexander N. Sapach[1]

[1] BELROSAKVA Limited Liability Company, Minsk, Republic of Belarus
[2] Joint Limited Liability Vompany “Aromatic”, Dzherzhinsk, Minsk Region, Republic of Belarus

KEYWORDS:
food, safety, biofilm, control, integration, monitoring, traceability, blockchain, artificial intelligence

ABSTRACT

Biofilm formation and its resistance to traditional cleaning and disinfection methods during food processing pose a significant threat to food safety and quality. These resilient microbial communities contribute to contamination, spoilage, and ultimately foodborne illness, highlighting the need for innovative and technology-driven control strategies. The objective of this scientific review is to analyze the current and potential roles of blockchain and artificial intelligence in biofilm management and to identify areas for future research and practical application of these technologies in food safety. This review focused on scientific publications published between 2022 and 2025. Keyword searches were conducted in the scientific databases Scopus and Web of Science, Google Scholar, and the Scientific Electronic Library “eLIBRARY.RU.” Publications were selected in two stages: at first, by titles and abstracts, then based on the analysis of full-text papers corresponding to the inclusion criteria. The analysis of the scientific research of the last years showed that modern digital tools, such as artificial intelligence, offer new opportunities for improving biofilm management. Blockchain enables real-time traceability of sanitary status, contamination events, and compliance activities throughout the supply chain. Machine learning and sensor-based monitoring facilitate operative control of microbiological stability and risk assessment of microbial multiplication. Together, these tools support data-driven decision-making and more active pollution prevention. However, it should be noted that data integration is costly. Further research should focus on refining AI models by improving data quality and complementing it, assessing the reliability of sensors in industrial settings, and exploring regulatory frameworks that balance innovation and safety compliance.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: **Бурак, Л. Ч., Сапач, А. Н., Сапач, А. Н.** (2026). Современные технологии блокчейна и искусственного интеллекта для контроля биопленки в пищевой промышленности. Обзор. *Пищевые системы*, 9(2), 347–356. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2026-9-2-347-356

FOR CITATION: **Burak, L. Ch., Zavaley, A.P., Sapach, A. N.** (2026). Modern blockchain and artificial intelligence technologies for biofilm control in the food industry. Review. *Food Systems,* 9(2), 347–356. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2026-9-2-347-356

1. Введение

Основная задача пищевой индустрии — обеспечение безопасности продуктов питания. Значимой проблемой в процессе производства является загрязнение биопленками, которые образуются на поверхностях, контактирующих с пищевыми продуктами, а также на технологическом оборудовании и в складских помещениях [1]. Данные микробные агрегаты обеспечивают защиту бактерий от воздействия факторов окружающей среды, воздействия моющих и дезинфицирующих средств, что позволяет бактериям длительное время сохраняться в технологической цепи. Такие патогены, как *Listeria monocytogenes*, *Salmonella* spp. и *Escherichia coli,* используют биопленки в качестве защитных ниш, что влечет за собой риск вспышек пищевых отравлений, отзыв продукции и экономические потери [2]. Механическая очистка, мойка и дезинфекция, а также периодический микробиологический контроль не всегда обеспечивают полное удаление биопленки [3]. Достаточно сложная современная пищевая цепочка поставок, в которую вовлечены многие заинтересованные стороны, нуждается в прослеживаемости и прозрачности для обеспечения безопасности продуктов питания. Поэтому в последние годы все большее внимание научного сообщества привлекают инновационные технологии, такие как искусственный интеллект (ИИ) и блокчейн [4]. Традиционные методы контроля не поддерживают прослеживаемость в реальном времени, что затрудняет оперативное выявление случаев заражения или отслеживание их происхождения по всей цепочке поставок. Задержка обнаружения образования биопленки не только увеличивает риск персистенции микроорганизмов, но и затрудняет сдерживание их распространения [5,6]. В сфере безопасности пищевых продуктов блокчейн облегчает отслеживание источников загрязнения в режиме реального времени, проверку соблюдения гигиенических норм и соответствие санитарной обработки нормативным требованиям [7]. В сочетании с датчиками Интернета вещей (IoT) системы блокчейн способны автоматически регистрировать данные об условиях окружающей среды и санитарной обработке, повышая прослеживаемость и безопасность [8,9]. Искусственный интеллект дополняет блокчейн, используя машинное обучение, компьютерное зрение и распознавание образов для обнаружения образования биопленок на ранних стадиях на основе поведения микроорганизмов и факторов окружающей среды [10]. Несмотря на то, что во многих обзорных публикациях рассматривались цифровые технологии для общего управления безопасностью пищевых продуктов, на момент написания настоящего обзора нами не было выявлено работ, посвященных совместному применению блокчейна и искусственного интеллекта для контроля биопленок. Во многих исследованиях эти технологии рассматривались изолированно или были сосредоточены на мониторинге цепочки поставок или микробиологического загрязнения.

Настоящий научный обзор посвящен оценке современных и перспективных подходов к использованию блокчейна и искусственного интеллекта в управлении процессами образования биопленок в пищевой промышленности. В статье уделено внимание интеграции данных технологий для повышения эффективности обнаружения, прослеживаемости и минимизации последствий образования биопленок, а также выявлению перспективных направлений дальнейших исследований и практического внедрения.

2. Материалы и методы

Поиск литературы проводился с использованием трех научных баз данных — Web of Science, Scopus и PubMed. Поисковые запросы были сформулированы на основе соответствующих статей о блокчейне и искусственном интеллекте для контроля биопленки в пищевой промышленности. Были использованы следующие ключевые слова: «food», «safety», «biofilm», «control,» «integration», «monitoring», «traceability», «blockchain», «artificial intelligence».

Критерии включения:

(1) статья написана в период 2020–2025 гг.;
(2) статья соответствует теме исследования;
(3) публикация относится к одному из следующих типов: оригинальные исследовательские статьи, обзорные статьи, краткие отчеты.

Критерии исключения:

(1) статья не соответствует теме данного обзора
(2) статья написана не на английском языке, статья на русском языке не входит в РИНЦ;
(3) содержание статьи не дублируется: при выявлении повторяющихся источников, извлеченных из разных баз данных или электронных библиотечных систем, такие публикации учитывались только один раз.

По результатам поиска из Web of Science, Scopus и PubMed было отобрано 145, 400 и 96 статей соответственно. После удаления дубликатов и проверки аннотаций и названий была проведена оценка 385 полнотекстовых статей. В итоге 99 исследований было включено в обзор на основании их релевантности теме исследования.

3. Образование биопленок в процессах переработки пищевых продуктов и цепочках поставок

Образование биопленки в пищевой промышленности и цепочках поставок является серьезной проблемой, поскольку оно способствует микробному загрязнению, порче пищевых продуктов и появлению стойких пищевых патогенов. Процесс образования биопленки включает в себя несколько этапов, начиная от прикрепления клеток бактерий к поверхностям за счет электростатического взаимодействия и гидрофобных сил. Дополнительной адгезии бактерий способствует наличие в пищевой цепи органических остатков, таких как белки и липиды [11]. Образование внеклеточных полимерных веществ (ВПВ), состоящих из полисахаридов, белков, внеклеточной ДНК и липидов, способствует стабилизации биопленки, обеспечивая целостность и устойчивость к факторам окружающей среды [12]. В процессе дальнейшего созревания биопленка образует трехмерную структуру с водными каналами, которые облегчают обмен питательными веществами и микробное взаимодействие. На последнем этапе биопленки высвобождают бактериальные клетки в окружающую среду, что вызывает обсемененность новых поверхностей и стойкое загрязнение [13]. На образование биопленок в условиях производства продуктов питания основное влияние оказывают такие факторы, как характеристика микроорганизмов, свойства поверхности и условия окружающей среды. Некоторые виды бактерий, такие как (например, *L. monocytogenes*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Pseudomonas fluorescens*, *Salmonella* Enteritidis и *Salmonella enterica*) обладают повышенной способностью к образованию биопленок [14]. Помимо характеристики микроорганизмов, немаловажную роль в процессе образования биопленок играют свойства материалов поверхностей, используемых в пищевой промышленности [15]. Нержавеющая сталь, полимерные пластмассы и резиновые прокладки, обычно используемые в оборудовании пищевых производств, неодинаково влияют на процесс образования биопленки. Например, шероховатость и водоотталкивающая способность таких материалов, как полиэтилен, способствуют адгезии бактерий, а наличие органических остатков существенно укрепляет структуру биопленки и повышает ее устойчивость [16]. Температура, влажность и наличие питательных веществ также оказывают влияние на образование биопленки. Так, например, низкая температура способствует выживанию *L. monocytogenes* и образованию биопленок на поверхностях холодильных установок и технологического оборудования. Напольные стоки, неиспользуемые распылительные форсунки и резервуары для воды на предприятиях пищевой промышленности создают благоприятную микросреду для размножения микроорганизмов и накопления биопленок. Способность психотропных бактерий *L. monocytogenes* выдерживать низкие температуры и их устойчивость к традиционным методам дезинфекции является значимой проблемой в производстве готовых к употреблению пищевых продуктов. На предприятиях молочной отрасли и переработки рыбы часто обнаруживаются представители рода *Pseudomonas* spp. Данные бактерии продуцируют протеолитические и липолитические ферменты, которые ухудшают качество пищевых продуктов и вызывают его порчу [17]. Такие патогены, как *S. enterica* и *Salmonella typhimurium*, образуют биопленки на поверхностях, включая пластик и стекло, проявляют устойчивость к кислой среде и высушиванию. Хорошо известный патоген *E. coli* O157: H7, который также образует биопленку, наиболее распространен на предприятиях мясной отрасли и в цепи поставок свежей продукции. Образование и сохранение биопленок в пищевой отрасли приводят к снижению качества продукции, экономическим потерям производителей и рискам для здоровья потребителей. Наибольшую тревогу исследователей вызывает повышенная устойчивость биопленок к дезинфицирующим и антимикробным средствам. Результаты исследований показали, что бактерии биопленки практически в 1000 раз устойчивее к санитарной обработке, чем их планктонные аналоги [18]. Источником многочисленных пищевых отравлений, имеющих последствия для уязвимых групп населения, таких как беременные, пожилые люди и лица с ослабленным иммунитетом, являлись патогены *L. monocytogenes* и *Salmonella* [19]. Данные патогены устойчивы к антимикробным препаратам, что требует разработки современных инновационных методов контроля биопленок на всей цепочке поставок пищевой продукции. Понимание механизмов, которые лежат в основе развития биопленок, а также факторов, способствующих их сохранению, имеет решающее

значение для внедрения эффективных мер по борьбе с биопленками в пищевой промышленности.

4. Технология блокчейн для борьбы с биопленками и обеспечения безопасности пищевых продуктов

Технология блокчейн способна максимально улучшить систему контроля безопасности продуктов питания. Ее внедрение на предприятие позволит обеспечить видимость в режиме реального времени, неизменность данных и сквозную прослеживаемость по всему циклу — от поставок сырья до реализации конечному потребителю. Как защищенный и децентрализованный реестр блокчейн записывает наиболее важные данные о безопасности пищевых продуктов. Так, например, в блокчейне могут регистрироваться данные контроля температуры пастеризации молочных продуктов, соков и напитков, а также результаты санитарно-микробиологического контроля санитарного состояния пищевых предприятий в режиме реального времени [20]. Внедрение технологии блокчейн позволит укрепить доверие между производителями, регулирующими органами и потребителями. Важной и эффективной возможностью применения технологии блокчейн является оперативное выявление источника микробного загрязнения. Контроль в режиме реального времени позволит оперативно локализовать источники загрязнения, что значительно снижает риски выпуска небезопасной продукции. Обеспечением прозрачности в цепочке поставок является регистрация неизменяемых данных каждого этапа от закупки сырья до поставки в торговую сеть [21]. Комбинирование блокчейна с датчиками Интернета вещей (IoT) и системами автоматизации обеспечит регистрацию данных о мойке и дезинфекции, а также результаты микробиологического контроля. Все это гарантирует непрерывный мониторинг объектов, наиболее подверженных образованию биопленок и являющихся контрольными критическими точками в технологическом процессе. Использование смарт-контрактов и автоматических систем оповещения позволит предприятиям не только эффективно бороться с возможным микробиологическим загрязнением, но и своевременно принимать профилактические меры [22]. Для максимальной эффективности интеграция блокчейна должна быть адаптирована к характеристикам и рискам, связанным с конкретными проблемными зонами, что позволит проводить вмешательства на основе данных и оперативно реагировать [23]. В совокупности такой подход максимально снизит риски микробного загрязнения, повысит ответственность производителей и уровень доверия потребителей к качеству и безопасности продуктов питания.

4.1. Контрольные критические точки биопленки в системах производства продуктов питания

Если мойка и дезинфекция технологического оборудования были проведены недостаточно эффективно, то в труднодоступных для обработки местах происходит накопление биопленки, которая представляет риск перекрестного загрязнения. Как уже отмечалось, поверхности, контактирующие с пищевыми продуктами, включая нержавеющую сталь, пластик и резину, способствуют сохранению биопленок по причине шероховатости поверхности и адаптации микроорганизмов. На Рисунке 1 представлена тепловая карта и гистограмма, показывающая относительные риски образования биопленок в различных зонах систем производства продуктов питания. Эти визуальные элементы выделяют критически важные области, требующие эффективной санитарной обработки и методов мониторинга. В этих целях технология блокчейн может быть интегрирована с датчиками IoT и системами мониторинга качества воды для создания в режиме реального времени неизменяемых записей о графиках санитарной обработки, результатах микробиологического анализа, состоянии санитарии и об условиях окружающей среды [24]. Улучшение прослеживаемости способствует обеспечению микробиологической стабильности продукции, ее соответствию нормативным требованиям и повышению подотчетности по всей цепочке поставок. Кроме того, это позволяет оперативно проводить вмешательство в зоны, подверженные образованию биопленок, тем самым повышая безопасность пищевых продуктов и минимизируя риски его загрязнения.

Эта горизонтальная гистограмма в виде тепловой карты визуализирует относительный риск образования биопленок в ключевых зонах предприятий пищевой промышленности. Каждый столбик окрашен в соответствии с градиентом от желтого (низкий риск) до красного (очень высокий риск), чтобы визуально представить степень риска образования биопленок. Эта диаграмма помогает определить приоритетные зоны для проведения мероприятий по очистке и мониторингу.

Влага, температурные колебания и остатки пищи создают благоприятные условия для образования биопленки на технологическом оборудовании пищевых производств такими бактериями, как *L. monocytogenes*, *Pseudomonas* spp. и *Salmonella* spp. Патогены легко прикрепляются к поверхностям, а элементы оборудования (ролики, шарниры, лезвия) с микротрещинами создают дополнительные укрытия для биопленок, снижая эффективность моющих и дезинфицирующих средств в процессе санитарной обработки [25]. Применение технологии блокчейн в комбинации с датчиками и системой видеонаблюдения позволит регистрировать критические точки санитарной обработки, своевременно выявлять проблемные зоны в режиме реального времени и включать оповещение для операторов. Fernández González et al. [26] провели пилотное исследование на предприятии по переработке молочной продукции: с помощью датчиков IoT, встроенных в поверхности, контактирующие с пищевыми продуктами, вели непрерывный контроль влажности и микробных метаболитов биопленки. Специалисты предприятия смогли отслеживать результаты санитарной обработки. Когда появлялась опасность образования биопленки, происходило автоматическое включение

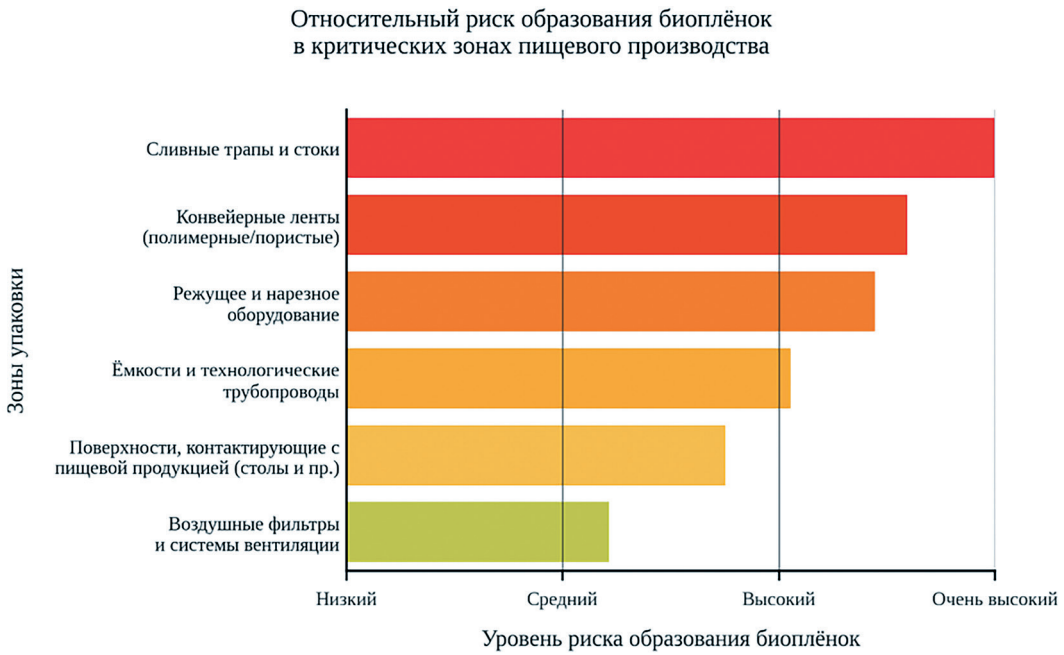


Рисунок 1. **Гистограмма относительного риска образования биопленок в ключевых зонах**
Figure 1. **Histogram of the relative risk of biofilm formation in key areas**

режима повторной мойки и дезинфекции. Многие элементы технологического оборудования, изготовленные из нержавеющей стали, пластика и резины, служат источником скопления микроорганизмов, и традиционная санитарная обработка не обеспечивает их полное удаление. Благодаря стойкости к коррозии нержавеющая сталь считается наиболее приемлемой для пищевого производства. Однако неровности и незначительные царапины на поверхности создают благоприятные условия для адгезии бактерий и формирования биопленок. Поверхность из пластика и резины более пористая, что способствует более глубокому проникновению бактерий, и в таких местах удалить биопленку значительно труднее [26]. В исследовании Brás A. et al. [27] показано, что биопленки, сформированные на резиновых прокладках оборудования и пластиковых разделочных досках, содержащие патогены *E. coli* и *Staphylococcus aureus*, демонстрировали устойчивость к длительному выживанию. Кроме того, эти микроорганизмы хорошо адаптируются к стрессу, так как могут изменять геном. Защитные механизмы и изменения генома объясняет их устойчивость к широко используемым моющим веществам и дезсредствам на основе хлора. Совместное использование блокчейна и искусственного интеллекта помогает контролировать микробную обсемененность и графики мойки и дезинфекции, чтобы своевременно выявить потенциальную опасность. Это позволяет своевременно и эффективно проводить дезинфекцию, корректировать концентрацию и постоянно улучшать санитарный контроль [28]. Особое внимание необходимо уделять водопроводу и резервуарам для воды, поскольку там очень часто образуются бактериальные пленки, которые могут быть источником загрязнения всего технологического процесса производства [29]. Такие бактерии, как *P. aeruginosa* и *Legionella pneumophila*, легко выживают в трубах, скрываясь в биопленках. При колебании давления воды частицы биопленок отрываются и могут попадать в продукт [30]. Кроме того, остаточный хлор может вступать в реакцию с липидами и белками, находящимися в биопленке, образовывая вредные побочные вещества [31]. Для предотвращения этого можно установить датчики качества воды, подключенные к блокчейну. Если они обнаружат аномальные уровни хлора или бактерий, смарт-контракты автоматически остановят конвейер. Система немедленно уведомит специалистов и запишет данные в защищенный от подделки журнал, обеспечивая соответствие всем стандартам безопасности. Холодильники и склады играют решающую роль в сохранении свежести продуктов, но даже низкие температуры не убивают бактериальные пленки. Некоторые микробы (*L. monocytogenes* и *Pseudomonas* spp.) способны адаптироваться к низким температурам. Они изменяют состав своих мембран и замедляют метаболизм, переходя в «сонный» режим, в котором могут выживать очень долго [32]. Чтобы избежать замерзания, эти бактерии вырабатывают специальные защитные белки и жирные кислоты, повышающие их стойкость к низким температурам. Кроме того, они образуют слой слизи, в который очень трудно проникают дезинфицирующие средства [33]. Системы на основе блокчейна помогают управлять данной ситуацией: они постоянно контролируют температуру и влажность, сравнивая фактические условия с санитарными нормами. В случае возникновения проблем система немедленно отправляет уведомление, и все принятые меры записываются в блокчейн с точным временем. Такая прозрачная проверка гарантирует правильное хранение пищевых продуктов и предотвращает образование опасных биопленок [34].

5. Процесс мониторинга с технологией блокчейн

Блокчейн позволяет осуществлять мониторинг процессов дезинфекции в производстве в режиме реального времени. Он может быть использован для реализации эффективных мер борьбы с бактериальными пленками. Ключевой особенностью здесь является создание цифровых журналов, которые невозможно изменить и подделать. Система записывает все: когда было вымыто оборудование, какие средства использовались, а также результаты микробиологических тестов в опасных зонах. Это гарантирует точность данных о безопасности пищевых продуктов (стандарты HACCP и GMP) [35]. Еще одно важное преимущество — обнаружение источников инфекции с помощью интеллектуальных датчиков (IoT). Они постоянно проверяют оборудование и поверхности, передавая данные непосредственно в блокчейн. Если уровень бактерий становится критическим, система автоматически отправляет сигнал тревоги в отдел качества. Это позволяет быстро принять меры до того, как пленка успеет образоваться. Кроме того, ИИ анализирует накопленные данные, выявляет закономерности и помогает прогнозировать, где могут возникнуть новые инфекции [36,37]. Технологии блокчейн делают всю цепочку поставок прозрачной. Производители, а также инспекционные органы и потребители могут видеть достоверную информацию о состоянии санитарии на производстве. Когда каждый этап документируется в блокчейне, это повышает уровень доверия к бренду, поскольку подтверждает соответствие продукции всем стандартам качества и безопасности [38]. Система блокчейна упрощает аудиты: внешние инспекторы могут в любое время сравнить отчеты об очистке с результатами испытаний в блокчейне. Этот метод уже успешно используется на мясоперерабатывающих предприятиях и в молочной отрасли. Внедрение блокчейна помогло этим предприятиям значительно снизить уровень загрязнения продукции, обеспечить микробиологическую стабильность и соблюдать установленные требования [39]. Аналогичным образом, в индустрии напитков решения для мониторинга на основе блокчейна позволяют отслеживать микробную нагрузку на линиях розлива и трубопроводах, а также оптимизировать процессы очистки и предотвращать порчу продукции. Эти приложения доказали свою эффективность в повышении прослеживаемости и обеспечении соблюдения гигиенических нормативов. Они также помогают минимизировать отзывы продукции, связанные с биопленками [40]. Молочное предприятие внедрило биосенсоры с интегрированной технологией блокчейн для мониторинга накопления биопленки *Listeria* на поверхностях из нержавеющей стали. Эта система способствовала снижению рисков вспышек заболеваний, обеспечив целенаправленные меры санитарной обработки и полную прослеживаемость зараженных партий [41]. На предприятиях по переработке морепродуктов блокчейн был объединен с биосенсорами на базе IoT для мониторинга образования биопленки на конвейерных лентах, поверхностях, контактирующих с рыбой, и резервуарах для хранения [42]. В Норвегии на предприятии по переработке лосося внедрили технологию блокчейн для мониторинга чистоты на всех этапах процесса охлаждения рыбы. Это помогло повысить прозрачность и значительно снизить бактериальное загрязнение (*Pseudomonas* spp. и *L. monocytogenes*) [43]. В настоящее время аналогичные системы используются на рыбоводческих фермах: датчики отслеживают качество воды (мутность, pH и наличие микроорганизмов) в режиме реального времени и записывают данные в блокчейн. Это позволяет владельцам ферм оперативно реагировать на нарушения гигиены и заболевания рыбы, что имеет огромное значение для экспортных поставок [41]. В дельте Меконга во Вьетнаме запуск аналогичного проекта позволил фермерам сократить использование антибиотиков благодаря созданию должного санитарного уровня. В результате улучшилось качество продукции, что привело к повышению ее востребованности за рубежом. Эти примеры показывают эффективность блокчейна не только в производстве молока и напитков, но и в рыболовной отрасли, где риск загрязнения продукции очень высок [44,45]. Конечно, необходимо отметить, что широкое внедрение блокчейна в настоящее время сдерживается высокими затратами, техническими трудностями и отсутствием единых нормативов и правил. Для решения этих проблем необходимо тесное сотрудничество между предприятиями, государственными органами и разработчиками программного обеспечения. В дальнейшем основное внимание следует уделить созданию доступных и простых платформ, которые смогут позволить себе даже небольшие компании и предприятия. Пилотные программы, демонстрирующие реальную прибыльность и снижение рисков, помогут технологии блокчейн стать стандартом и найти широкое применение в пищевой промышленности.

6. Роль искусственного интеллекта (ИИ) в борьбе с биопленкой

Искусственный интеллект значительно изменил подход к безопасности пищевых продуктов. Машинное обучение и компьютерное зрение теперь могут не только обнаруживать опасные микробные популяции, но и более эффективно контролировать гигиену на предприятиях. Эти программы анализируют большой объем данных, включая результаты анализов и изменения температуры и влажности. Это важно, поскольку биопленки растут наиболее быстро во влажных и теплых условиях [46]. Специальные камеры (компьютерное зрение) в сочетании с датчиками позволяют обнаруживать налет даже там, где его не видит человеческий глаз — на конвейерах и рабочих поверхностях [47].

Искусственный интеллект стал революционным инструментом в области безопасности пищевых продуктов, предлагая передовые решения для обнаружения и предотвращения образования биопленок. Технологии, основанные на ИИ, включая машинное обучение, компьютерное зрение и глубокое обучение, позволяют точно идентифицировать микробные биопленки и улучшать управление гигиеной пищевых продуктов [46]. Модели машинного обучения анализируют обширные наборы данных микробиологических исследований, а также факторы окружающей среды, такие как повышенная влажность или

колебания температуры, которые тесно связаны с развитием биопленок в условиях пищевой промышленности [38]. Мониторинг биопленок в режиме реального времени значительно улучшается благодаря технологиям визуализации и сенсорным технологиям, основанным на ИИ. Компьютерное зрение в сочетании с гиперспектральной визуализацией и обнаружением на основе флуоресценции позволяет точно идентифицировать наличие биопленок на поверхностях, контактирующих с пищевыми продуктами, и на технологическом оборудовании [47]. Например, системы гиперспектральной визуализации с поддержкой ИИ достигли точности обнаружения, превышающей 90%, с показателем полноты обнаружения выше 88%, как сообщалось в недавних пилотных исследованиях [48,49]. Кроме того, сети датчиков IoT на базе ИИ непрерывно отслеживают рост микроорганизмов, условия окружающей среды и эффективность санитарной обработки, обеспечивая раннее обнаружение биопленок до того, как риски загрязнения возрастут [49]. Пилотные исследования продемонстрировали практическое применение этих технологий. Прототип гиперспектральной системы визуализации на основе ИИ был протестирован на молочном заводе, достигнув точности более 90% в обнаружении биопленок *Listeria* на поверхностях из нержавеющей стали, что позволило проводить целенаправленные мероприятия по очистке [50]. Другой пилотный проект на мясоперерабатывающем предприятии интегрировал алгоритмы машинного обучения с данными датчиков для прогнозирования очагов образования биопленок, снизив количество случаев загрязнения на 30% в течение 6 месяцев [51]. Основные методы применения ИИ для мониторинга и блокирования роста бактериальных пленок обобщены в Таблице 1. В ней показано, как различные алгоритмы решают конкретные задачи в производстве.

7. Использование блокчейна и ИИ для управления биопленками

Комбинированное использование блокчейна и искусственного интеллекта в индустрии пищевой безопасности — это принципиально новый этап в борьбе с биопленками. Главная ценность этой связки заключается в синергии: если блокчейн гарантирует абсолютную прозрачность и неизменность истории данных, то ИИ привносит в систему «мозг» — способность предсказывать опасность микробной обсемененности и мгновенно анализировать ситуацию. Такой тандем позволяет вывести управление качеством на принципиально иной уровень [35,61]. Взаимодействуя, эти технологии обеспечивают непрерывный цикл контроля: от ранней фиксации признаков загрязнения до превентивного вмешательства в процесс их формирования. Ключевой фактор успеха заключается в моментальном обмене данными и использовании прогнозных моделей. Блокчейн выступает в роли сверхнадежного цифрового журнала, куда записываются показатели датчиков и выводы алгоритмов ИИ. Благодаря децентрализации эта информация остается доступной и защищенной для всех звеньев логистической цепочки. Конечные пользователи и надзорные органы могут отслеживать санитарные риски в реальном времени через привычные цифровые инструменты: от мобильных приложений до облачных дашбордов [62]. Интеграция ИИ с блокчейном еще больше укрепляет системы безопасности пищевых продуктов, обеспечивая прослеживаемость, соответствие требованиям и проактивное управление рисками, что значительно снижает количество случаев загрязнения, связанных с биопленками. Обзор результатов исследований интеграции блокчейна и искусственного интеллекта для контроля биопленки представлен в Таблице 2.

Таблица1. Обзор **основных методов применения искусственного интеллекта (ИИ)**

Table 1. **Overview of the main methods for using artificial intelligence (AI)**

Элементы ИИ	Выполняемые функции	Управление биопленкой	Примеры использования	Источник
Машинное обучения (МО)	Собирает и изучает всю информацию обо всех случаях заражения, чтобы заранее рассчитать вероятность возникновения нового случая инфицирования	Создает модели, которые прогнозируют, какие конкретные производственные зоны или оборудование подвержены более высокому риску образования биопленки	На молочных заводах такие модели помогают выявлять *L. monocytogenes* до их распространения	[52]
Глубокое обучение	Использует передовые нейронные сети, способные «видеть» микробы на сложных микроскопических изображениях	Используя мультиспектральный анализ, обнаруживает даже мельчайшие следы пленки, невидимые при обычном осмотре	Программное обеспечение обнаруживает *Salmonella* на поверхностях, анализируя спектр отраженного света	[53]
Биосенсоры на базе ИИ	Обнаруживают специальные вещества (маркеры), выделяемые бактериями в начале построения их защитной оболочки	Помогают быстро обнаруживать загрязнения в трубах и системах водоснабжения, где ручной осмотр наиболее затруднен	Интеллектуальный датчик обнаруживает кишечную палочку (*E. coli*) посредством химического анализа воды и немедленно передает данные в общую сеть	[54]
Обработка естественного языка (ОЕЯ)	Анализирует отчеты о санитарных нормах и соблюдении нормативных требований для оценки риска образования биопленки	На основе отчетов по контролю выявляет потенциальные риски, связанные с биопленкой	Система анализирует отчеты HACCP и определяет наиболее уязвимые критические точки на предприятии	[55]
Автономные роботы-уборщики с искусственным интеллектом	Используют навигацию на основе искусственного интеллекта для обнаружения очагов биопленки	Повышают качество обработки труднодоступных поверхностей, контактирующих с пищевыми продуктами	Роботизированная система на основе ИИ для удаления биопленки при переработке морепродуктов	[56]
Гибридные подходы к ИИ	Объединяет несколько методов ИИ для улучшенного контроля биопленки	Интегрирует машинное обучение, Интернет вещей и биосенсоры для комплексного мониторинга	Комбинированный подход МО-биосенсора для биопленок *S. aureus*	[57]
Химическая оптимизация с использованием ИИ	Прогнозирует оптимальные формулы биоцидов и дезинфицирующих средств	Снижает устойчивость к противомикробным препаратам, сохраняя при этом эффективность	Оптимизированная для ИИ формула дезинфицирующего средства для контроля биопленки на молочных заводах	[58]
ИИ в прогнозировании устойчивости биопленки	Анализирует данные генетической и фенотипической резистентности	Прогнозирует новые тенденции резистентности у бактерий, образующих биопленку в пищевых продуктах	Профилирование резистентности *Campylobacter jejuni* у домашней птицы с помощью ИИ	[56]
Мониторинг окружающей среды с помощью ИИ	Учитывает условия окружающей среды с рисками образования биопленки	Корректирует методы обработки на основе влажности, температуры и pH	Моделирование влияния микроклимата на образование биопленки на молочных предприятиях с помощью ИИ	[59]
Системы принятия решений с поддержкой ИИ	Предоставляет рекомендации в режиме реального времени для отдела качества на предприятии	Уменьшает время реагирования на случаи загрязнения биопленкой	Система поддержки принятия решений HACCP на базе ИИ для снижения рисков образования биопленки	[60]

Таблица 2. **Обзор интеграции блокчейна и ИИ для контроля биопленки**
Table 2. **Overview of blockchain and AI integration for biofilm control**

Основные цели интеграции	Функция блокчейна	Функция ИИ	Ожидаемый результат	Источник
Безопасный сбор данных	Хранит защищенные т несанкционированного доступа записи с датчиков, отслеживающих образование биопленки	Обрабатывает и анализирует данные датчиков в реальном времени	Обеспечивает точные и неизменяемые записи о росте биопленки	[63]
Смарт-контракты для протоколов санитарии	Обеспечивают соблюдение протоколов санитарии	Обнаруживают аномалии	Обеспечивают соответствие	[64]
Прослеживаемость источников загрязнения	Устанавливает следы загрязнения	Предсказывает источники	Обеспечивает более быстрое сдерживание	[24]
Оповещения о загрязнении в режиме реального времени	Регистрируют события загрязнения	Запускают оповещения	Обеспечивает оперативное реагирование	[25]
Графики прогностического обслуживания	Хранят журналы использования	Предсказывают неудачи	Предотвращают риски загрязнения	[56]
Графики прогностического обслуживания	Хранят журналы использования	Предсказывают неудачи	Предотвращают риски загрязнения	[35]
Децентрализованный обмен данными о биопленке	Обеспечивает безопасный децентрализованный обмен данными о биопленке	Анализирует модели риска	Улучшает сотрудничество между участниками производственно-логистической цепочки	[35]
Системы отчетности, готовые к аудиту	Поддерживают неизменяемые аудиторские отчеты	Автоматизируют генерацию отчетов	Упрощают аудит	[65]
Оптимизация ресурсов на основе ИИ	Ведет цифровой учет использования химикатов	Обеспечивает рациональное использование ресурсов	Способствует устойчивому развитию	[66]

8. Роль Интернета вещей (IoT) в борьбе с биопленками с помощью блокчейна и искусственного интеллекта

Системы на основе IoT используют интеллектуальные датчики и мониторинг в реальном времени для обнаружения микробного загрязнения, в то время как блокчейн обеспечивает безопасное управление данными, а ИИ позволяет проводить прогнозный анализ для упреждающего вмешательства. Эта синергия повышает эффективность обнаружения биопленок, снижает риски загрязнения и улучшает управление безопасностью пищевых продуктов [18]. Биосенсоры с поддержкой IoT, включая оптические, электрохимические и нанотехнологические платформы, обнаруживают образование биопленок в режиме реального времени. Эти датчики отслеживают микробную активность на поверхностях, контактирующих с пищевыми продуктами, на технологическом оборудовании и в складских помещениях, идентифицируя патогены, такие как *L. monocytogenes*, *P. aeruginosa*, *P. fluorescens*, *S. enterica*, *S. typhimurium* и *S. enteritidis*. Анализ данных датчиков с помощью ИИ прогнозирует очаги загрязнения и оптимизирует параметры обработки, а автоматические оповещения запускают своевременные меры санитарной обработки, снижая устойчивость биопленок. IoT облегчает мониторинг микробной активности в режиме реального времени по всей цепочке поставок пищевых продуктов с использованием RFID-меток, беспроводных сенсорных сетей и облачных платформ [67,68]. Например, беспроводные сенсорные сети и RFID-метки широко используются для мониторинга микробиоты в режиме реального времени по всей цепочке поставок продуктов питания, что позволяет оперативно реагировать на нарушения гигиены на предприятиях по переработке мяса и молочных продуктов [69]. На птицеперерабатывающих заводах датчики IoT были интегрированы с алгоритмами ИИ для обнаружения раннего образования биопленок на конвейерных лентах, что запускало автоматическую активацию системы CIP и сокращало количество случаев загрязнения более чем на 30% [70]. Аналогичным образом, на одном из европейских предприятий по упаковке свежих продуктов были внедрены электрохимические биосенсоры с поддержкой IoT в сочетании с блокчейном для мониторинга биопленок *Listeria*, что привело к сокращению количества отзывов продукции из-за загрязнения на 25% [71]. Интеграция блокчейна обеспечивает прозрачную и защищенную от подделки документацию о случаях загрязнения и санитарных записях. Прогностические модели на основе ИИ анализируют тенденции загрязнения, позволяя адаптировать графики уборки и антимикробные мероприятия. Интеллектуальная автоматизация, такая как системы CIP с управлением датчиками, повышает эффективность санитарной обработки, минимизируя чрезмерное использование химикатов и обеспечивая безопасность пищевых продуктов. Огромный объем данных, генерируемых устройствами IoT, требует надежных мер безопасности. Блокчейн обеспечивает целостность данных, предоставляя неизменяемую, децентрализованную запись случаев загрязнения и мероприятий по его устранению [72].

8.1. Цифровые биосенсоры для быстрого обнаружения биопленок

Разработка цифровых биосенсоров кардинально изменила подход к обнаружению биопленок в пищевой промышленности, обеспечив мониторинг в реальном времени и раннее вмешательство. Передовые технологии биосенсорики обеспечивают быстрый, чувствительный и неинвазивный подход к обнаружению биопленок, минимизируя риски загрязнения и улучшая санитарно-гигиенический контроль. Традиционные методы обнаружения микроорганизмов, такие как культуральные методы и полимеразная цепная реакция (ПЦР), как правило, являются трудоемкими и занимают много времени. В то же время цифровые биосенсоры позволяют быстро и в реальном времени обнаруживать биопленки, выявляя биохимические изменения, связанные с прикреплением микроорганизмов и производством ВПВ на ранних стадиях образования [73]. Биосенсоры на основе ИИ используют машинное обучение для анализа закономерностей роста микроорганизмов, улучшая прогнозируемое обнаружение, а биосенсоры с поддержкой IoT передают данные о загрязнении в облачные системы управления безопасностью пищевых продуктов. Кроме того, технология блокчейн обеспечивает безопасную документацию показаний биосенсоров, предоставляя проверяемые записи для соблюдения нормативных требований [74].

Биосенсоры обнаруживают биопленки, ориентируясь на метаболическую активность микроорганизмов, свойства адгезии и компоненты внеклеточных полимерных веществ (ВПВ). Электрохимические биосенсоры отслеживают окислительно-восстановительные реакции, связанные с метаболизмом микроорганизмов или изменениями поверхностной проводимости, а импедансные датчики измеряют изменения электрического сопротивления, вызванные адгезией биопленки [75]. Амперометрические и потенциометрические датчики обнаруживают побочные продукты метаболизма микроорганизмов, такие как перекись водорода и органические кислоты, сигнализируя о наличии биопленки. Современные методы обнаружения биопленок во многом опираются на возможности оптических биосенсоров. Системы, работающие на принципах флуоресценции или поверхностного плазмонного резонанса, фиксируют изменения в показателях преломления и интенсивности свечения в момент, когда микроорганизмы закрепляются на поверхности [76]. Значительное развитие в этом направлении произошло благодаря внедрению наноматериалов: использование графена, углеродных нанотрубок и золотых наночастиц на порядок подняло уровень чувствительности приборов [77].

Такие наносенсоры не просто точнее фиксируют сигнал, они позволяют «засечь» формирование биопленки на самых ранних этапах благодаря сверхнизким пределам обнаружения. Комбинируя оптические, электрохимические и нанотехнологические решения, инженеры получают платформы для оперативного вмешательства, что критически важно для снижения рисков микробного загрязнения.

Дальнейший прогресс здесь неразрывно связан с цифровизацией: объединение сенсоров с ИИ, интернетом вещей (IoT) и блокчейном превращает разрозненные данные в интеллектуальную систему

контроля [78,79]. Очевидно, что по мере совершенствования этих технологий методы обеспечения пищевой безопасности станут более точными, а роль биосенсоров в управлении качеством продуктов будет только расти.

8.2. Интеллектуальная упаковка с интегрированной технологией блокчейн для предотвращения образования биопленок

Интеллектуальная упаковка на основе блокчейна обеспечивает прозрачную, защищенную от подделки запись условий хранения и рисков микробного загрязнения, позволяя заинтересованным сторонам отслеживать качество пищевых продуктов на протяжении всего процесса распределения. Эта система обеспечивает целостность пищевых продуктов путем безопасной записи данных датчиков в децентрализованный реестр, к которому могут получить доступ в реальном времени производители, розничные продавцы и потребители. Это способствует предотвращению загрязнения, связанного с биопленками [80]. Ключевой особенностью интеллектуальной упаковки является включение датчиков времени и температуры, которые отслеживают условия окружающей среды, влияющие на рост микроорганизмов [80,81]. Еще одним важным нововведением в области интеллектуальной упаковки является применение антимикробных покрытий, предназначенных для подавления образования биопленок. Упаковочные материалы с антимикробными агентами, такими как наночастицы серебра, органические кислоты и эфирные масла, создают неблагоприятную поверхность для адгезии микроорганизмов [81]. В сочетании с мониторингом на основе блокчейна интеллектуальная антимикробная упаковка обеспечивает комплексную защиту от микробного загрязнения, предотвращая образование биопленок и поддерживая проверяемые данные о безопасности [82]. Синергия между технологией блокчейн и интеллектуальной упаковкой значительно повышает эффективность управления безопасностью пищевых продуктов, обеспечивая доступ к данным в режиме реального времени, автоматическое обнаружение загрязнений и надежную документацию параметров качества пищевых продуктов [83]. По мере развития исследований дальнейшие инновации в сенсорных технологиях и антимикробных упаковочных материалах оптимизируют стратегии предотвращения образования биопленок, обеспечивая более безопасную и надежную цепочку поставок пищевых продуктов.

8.3. Дополненная реальность (AR) и виртуальная реальность (VR) для обучения методам борьбы с биопленками

Технологии дополненной реальности (AR) и виртуальной реальности (VR) обеспечивают захватывающие интерактивные среды обучения, которые улучшают способность работников выявлять, оценивать и удалять биопленки на предприятиях пищевой промышленности [83]. В отличие от традиционных подходов к обучению, которые основаны на теоретическом инструктаже и периодических семинарах, AR и VR предлагают динамические симуляции в реальном времени, которые воспроизводят сценарии загрязнения, что делает обучение контролю биопленок более эффективным и увлекательным [84]. Технология дополненной реальности (AR) накладывает цифровую информацию на физическую среду, позволяя работникам визуализировать микробное загрязнение поверхностей в режиме реального времени. Эти системы могут быть запрограммированы на распознавание различных микробных опасностей, предоставляя индивидуальные инструкции по устранению различных рисков загрязнения. Такое руководство минимизирует ошибки в борьбе с биопленками и обеспечивает соблюдение строгих правил безопасности пищевых продуктов [85]. Виртуальная реальность (VR), напротив, погружает обучающихся в полностью смоделированную среду, воспроизводя сложные процессы образования и удаления биопленок с высокой точностью [16,86]. Модули на основе виртуальной реальности позволяют работникам непосредственно столкнуться с ситуациями загрязнения, проверяя их способность идентифицировать биопленки, выбирать подходящие дезинфицирующие средства и применять стратегии очистки без рисков, связанных с ошибками в реальной жизни [87]. Виртуальные симуляции позволяют наглядно разбирать микробиологические механизмы формирования биопленок в самых разных условиях. Благодаря такому погружению персонал получает гораздо более четкое представление о том, как именно развиваются процессы загрязнения на производстве. Помимо чисто образовательной функции, технологии дополненной и виртуальной реальности (AR/VR) упрощают выполнение нормативных требований: они предлагают стандартизированные сценарии обучения, полностью отвечающие протоколам безопасности вроде HACCP или FSMA. Если же объединить AR/VR с облачными системами управления обучением, компания может полностью автоматизировать контроль квалификации сотрудников — от отслеживания прогресса до фиксации статуса сертификации в едином цифровом реестре [88].

8.4. Применение «искусственной кожи» и носимых сенсоров для обнаружения биопленок

Прогресс в области сенсорики привел к появлению носимых устройств и систем на базе «искусственной кожи», способных мониторить микробный фон на пищевых объектах в режиме реального времени [89,90]. Подобные датчики, интегрированные непосредственно в перчатки, браслеты или элементы защитной одежды, обеспечивают непрерывное и неинвазивное наблюдение. Это позволяет существенно снизить риск перекрестного загрязнения, не останавливая производственный цикл.

Технологически такие биосенсоры базируются на гибких биосовместимых подложках с наноструктурированными преобразователями. Они способны распознавать специфические химические «отпечатки» биопленок — например, продукты метаболизма или сигнальные молекулы чувства кворума (EPS) [91]. Как только уровень загрязнения превышает норму, сотрудник мгновенно получает обратную связь через визуальный индикатор или цифровое уведомление [92]. Несмотря на перспективность, массовое внедрение подобных гаджетов пока ограничено вопросами их долговечности, устойчивости к регулярной дезинфекции и необходимости тщательной калибровки в реальных цеховых условиях. Обеспечение возможности многократного использования этих устройств, их устойчивости к протоколам очистки и тестирования в различных пищевых средах остается ключевой проблемой для их широкого внедрения [93]. «Умный» текстиль расширяет возможности применения носимых биосенсоров в мониторинге микроорганизмов за счет включения проводящих волокон и микрофлюидных сетей, способных обнаруживать адгезию бактерий и метаболическую активность. Эти текстильные изделия, встроенные в рабочую униформу или фартуки, могут непрерывно оценивать уровни загрязнения и передавать данные в централизованную систему управления безопасностью пищевых продуктов [94,95]. Будущее технологий обнаружения биопленок на основе искусственной кожи и носимых устройств заключается в их бесшовной интеграции с цифровыми платформами безопасности пищевых продуктов, аналитикой на основе ИИ и автоматизированными системами управления гигиеной.

9. Проблемы и ограничения внедрения блокчейна и искусственного интеллекта в управлении биопленками

Хотя блокчейн и ИИ обладают огромным потенциалом для трансформации в управлении биопленками, для их успешного внедрения в пищевой промышленности необходимо решить ряд проблем. Эти проблемы затрагивают технические, финансовые, нормативные и этические аспекты, требуя целенаправленных исследований, межотраслевого сотрудничества и стратегической реализации. Одной из основных технических трудностей является интеграция данных [67]. Эффективность комбинирования блокчейна и ИИ напрямую зависит от качества и объема поступающих данных. Информация поступает из множества источников — от датчиков IoT до производственных журналов, при этом свести ее в единую, пригодную для анализа систему крайне сложно. Главными барьерами здесь является отсутствие стандартизации и задержки в обработке потоков в реальном времени [96]. Ситуацию усложняют ошибки калибровки сенсоров и плохая фильтрация «шума», что напрямую влияет на скорость реакции системы и на точность прогнозов [97].

Масштабируемость остается ключевым ограничением для малого и среднего бизнеса. Существующая инфраструктура зачастую недостаточно гибка для быстрой адаптации к специфическим условиям конкретного производственного участка. При этом точность ИИ-моделей критически зависит от того, насколько полными и достоверными будут исходные данные [56]. Любой дефицит информации делает прогнозы неточными, что фактически делает неэффективными все стратегии по предотвращению образования биопленок [56]. Нельзя игнорировать и финансовую сторону вопроса. Огромные затраты на разработку, монтаж и поддержку вычислительных мощностей становятся непреодолимой преградой для многих игроков рынка [98]. К этому стоит добавить кадровый голод: отрасли остро нужны не просто техники, а специалисты на стыке анализа данных и микробиологии. Возможным решением здесь могло бы стать государственное финансирование и вовлечение небольших предприятий в пилотные программы на льготных условиях.

Наконец, внедрение технологий сдерживается фрагментированностью нормативно-правовой базы. Пищевая промышленность — отрасль, требующая строгого санитарно-микробиологического контроля

на всех этапах производства, однако единых международных протоколов для обмена данными в блокчейн-системах пока не существует. Это приводит к разрывам в цепочках поставок и снижает эффективность межорганизационного взаимодействия. Очевидно, что ключевая роль в решении данной проблемы должна принадлежать организации ISO, чьи стандарты способны обеспечить гармонизацию цифровых систем безопасности в глобальном масштабе [99]. Параллельно необходимо учитывать этические аспекты: прозрачность блокчейн-систем не должна приводить к утечке запатентованных технологий или коммерческой тайны компаний.

10. Заключение

Борьба с биопленками в современном пищевой отрасли требует перехода от точечных мер к многоуровневым системам, в которых передовой мониторинг интегрирован с современными антимикробными методами. В настоящее время взаимосвязь блокчейна и искусственного интеллекта позволяет не только фиксировать случаи бактериального загрязнения продукции, но и осуществлять прогнозирование и предотвращение рисков. Блокчейн обеспечивает прозрачность истории каждой санитарной обработки, а нейросети реализуют предиктивную аналитику. Дополнительный потенциал создает внедрение IoT-устройств, которые превращают непрерывный сбор данных в реальный инструмент защиты продуктов питания.

Тем не менее, внедрение данных технологий сдерживается высокими затратами, нормативными пробелами и разрывом между лабораторными разработками и промышленной практикой. Чтобы преодолеть этот барьер, отрасли необходим переход к единым протоколам данных и активное инвестирование в обучение людей, способных работать с цифровыми системами. Государственно-частное партнерство и запуск пилотных проектов способны продемонстрировать рентабельность таких вложений. В будущем фокус исследований должен сместиться на повышение качества данных для обучения ИИ, на проверку живучести датчиков в агрессивных средах и на поиск баланса между внедрением инноваций и жесткими требованиями безопасности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / REFERENCES

1. Бурак, Л. Ч. (2025). Перспективы использования технологии сверхкритического диоксида углерода в пищевой промышленности. Обзор предметного поля. *Ползуновский вестник*, 1, 32–50. [Burak, L. Ch. (2025). Prospects for using supercritical carbon dioxidetechnology in food industry. Subject field overview. *Polzunovsky Vestnik*, 1, 32–50. (In Russian)] https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2025.01.004
2. Бурак, Л. Ч., Завалей, А. П. (2024). Эффективность комбинированного воздействия ультразвука и микроволн при обработке пищевых продуктов. Обзор. *Техника и технология пищевых производств,* 54(2), 342–357. [Burak, L. Ch., Zavalei, A. P. (2024). Combined ultrasound and microwave food processing: Efficiency review. *Food Processing: Techniques and Technology*, 54(2), 342–357 (In Russian)] https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-2-2510
3. Dallagi, H., Jha, P. K., Faille, C., Le-Bail, A., Rawson, A., Benezech, T. (2023). Removal of biocontamination in the food industry using physical methods; an overview. *Food Control,* 148, Article 109645. https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2023.109645
4. Duan, K., Onyeaka, H., Pang, G., Meng, Z. (2024). Pioneering food safety: Blockchain's integration in supply chain surveillance. *Journal of Agriculture and Food Research,*18, Article 101281. https://doi.org/10.1016/j.jafr.2024.101281
5. Anamul Hasan Chowdhury, M., Ashrafudoulla, Md., Isaïe Ulrich Mevo, S., Mahamud, A. G. M. S. U., Sanat Anjum Reem, C., Jie-won Ha, A. et al. (2024). Efficacy of orange terpene against escherichia coli biofilm on beef and food contact surfaces. *Food Research Internation*, 197, Article 115204. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2024.115204
6. Abebe, G. M. (2020). The role of bacterial biofilm in antibiotic resistance and food contamination. *International Journal of Microbiology*, 2020(1), Article 1705814. https://doi.org/10.1155/2020/1705814
7. Verna, E., Genta, G., Galetto, M. (2025). Enhanced food quality by digital traceability in food processing industry. *Food Engineering Reviews*, 17(2), 359–383. https://doi.org/10.1007/s12393-024-09392-4
8. Khan, H., Jan, Z., Ullah, I., Alwabli, A., Alharbi, F., Habib, S. et al. (2024). A deep dive into AI integration and advanced nanobiosensor technologies for enhanced bacterial infection monitoring. *Nanotechnology Reviews*, 13(1), Article 20240056. https://doi.org/10.1515/ntrev-2024-0056
9. Bhowmik, D., Rickard, J. J. S., Jelinek, R., Goldberg Oppenheimer, P. (2024). Resilient sustainable current and emerging technologies for foodborne pathogen detection. *Sustainable Food Technology*, 3(1), 10–31. https://doi.org/10.1039/D4FB00192C
10. Dhal, S. B., Kar, D. (2025). Leveraging artificial intelligence and advanced food processing techniques for enhanced food safety, quality, and security: A comprehensive review. *Discover Applied Sciences*, 7(1), Article 75. https://doi.org/10.1007/s42452-025-06472-w
11. Zhao, A., Sun, J., Liu, Y. (2023). Understanding bacterial biofilms: from definition to treatment strategies. *Frontiers in Cellular and Infection Microbiology*, 13, Article 1137947. https://doi.org/10.3389/fcimb.2023.1137947
12. David, A., Tahrioui, A., Tareau, A.-S., Forge, A., Gonzalez, M., Bouffartigues, E. et al. (2024). *Pseudomonas aeruginosa* biofilm lifecycle: Involvement of mechanical constraints and timeline of matrix production. *Antibiotics*, 13(8), Article 688. https://doi.org/10.3390/antibiotics13080688
13. Patra, S., Saha, S., Singh, R., Tomar, N., Gulati, P. (2025). Biofilm battleground: Unveiling the hidden challenges, current approaches and future perspectives in combating biofilm associated bacterial infections. *Microbial Pathogenesis*,198, Article 107155. https://doi.org/10.1016/j.micpath.2024.107155
14. Elafify, M., Liao, X., Feng, J., Ahn, J., Ding, T. (2024). Biofilm formation in food industries: Challenges and control strategies for food safety. *Food Research International*, 190, Article 114650. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2024.114650
15. Juszczuk-Kubiak, E. (2024). Molecular aspects of the functioning of pathogenic bacteria biofilm based on quorum sensing (QS) signal-response system and innovative non-antibiotic strategies for their elimination. *International Journal of Molecular Sciences*, 25(5), Article 2655. https://doi.org/10.3390/ijms25052655
16. Coppola, F., Fratianni, F., Bianco, V., Wang, Z., Pellegrini, M., Coppola, R. et al. (2025). New methodologies as opportunities in the study of bacterial biofilms, including food-related applications. *Microorganisms*, 13(5), Article 1062. https://doi.org/10.3390/microorganisms13051062
17. Chowdhury, M. A. H., Sarkar, F., Reem, C. S. A., Rahman, S. M., Mahamud, A. G. M. S. U., Rahman, Md. A. et al. (2024). Enzyme applications in baking: From dough development to shelf-life extension. *International Journal of BiologicalMacromolecules,* 282(4), Article 137020. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.137020
18. Dawan, J., Zhang, S., Ahn, J. (2025). Recent advances in biofilm control technologies for the food industry. *Antibiotics*, 14(3), Article 254. https://doi.org/10.3390/antibiotics14030254
19. Anupama, A., Pattapulavar, V., Christopher, J. G. (2025). The past, present, future of listeria monocytogenes: Understanding the molecular pathways, antibiotic resistance and public health implication. *Medicine in Microecology*, 25, Article 100127. https://doi.org/10.1016/j.medmic.2025.100127
20. Sri Vigna Hema, V., Manickavasagan, A. (2024). Blockchain implementation for food safety in supply chain: A review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 23(5), Article e70002. https://doi.org/10.1111/1541-4337.70002
21. Wahyuni, H. C., Rosid, M. A., Azara, R., Voak, A. (2024). Blockchain technology design based on food safety and halal risk analysis in the beef supply chain with FMEA-FTA. *Journal of Engineering Research*, 13(2), 590–595. https://doi.org/10.1016/j.jer.2024.02.002
22. Herzog, D., Herzog, N. (2024). Blockchain technology and sanitary aspects of the water supply. *Archives of Case Reports: Open Access (ACROA)*, 1(1), 1–11. https://doi.org/10.20944/preprints202403.1620.v1
23. Oriekhoe, O. I., Ilugbusi, B. S., Adisa, O. (2024). Ensuring global food safety: Integrating blockchain technology into food supply chains. *Engineering Science and Technology Journal*, 5(3), 811–820. https://doi.org/10.51594/estj.v5i3.905
24. Mahunu, G. K., Osei-Kwarteng, M., Ogwu, M. C., Afoakwah, N. A. (2024). Safe food handling techniques to prevent microbial contamination. Chapter in a book: Food Safety and Quality in the Global South. Springer, 2024. https://doi.org/10.1007/978-981-97-2428-4_14
25. Radi Benjelloun, G., Chouhbi, O., Bahlaouan, B., Bennani, M., El Antri, S., Boutaleb, N. (2025). Biofilms in the food industry: Adhesion mechanisms, control strategies, and mastery. *Natural Built Social Environment Health*, 1(1), 41–80. https://doi.org/10.63095/NBSEH.25.650223
26. Fernández González, A., Badía Laíño, R., Costa-Fernández, J. M., Soldado, A. (2024). Progress and challenge of sensors for dairy food safety monitoring. *Sensors*, 24(5), Article 1383. https://doi.org/10.3390/s24051383
27. Brás, A., Braz, M., Martinho, I., Pereira, C., Almeida, A. (2024). Effect of bacteriophages against biofilms of *Escherichia coli* on food processing surfaces. *Microorganisms*, 12(2), Article 366. https://doi.org/10.3390/microorganisms12020366
28. Ding, H., Tian, J., Yu, W., Wilson, D. I., Young, B. R., Cui, X. et al. (2023). The application of artificial intelligence and big data in the food industry. *Foods*, 12(24), Article 4511. https://doi.org/10.3390/foods12244511
29. Тутельян, А. В., Юшина, Ю. К., Соколова, О. В., Батаева, Д. С., Фесюн, А. Д., Датий, А. В. (2019). Образование биологических пленок микроорганизмов на пищевых производствах. *Вопросы питания*, 88(3), 32–43. [Tutelyan, A. V., Yushina, Yu. K., Sokolova, O. V., Bataeva, D. S., Fesyun, A. D., Datiy, A. V. (2019). Название по данным журнала: Formation of biological films by microorganisms in food productions. *Problems of Nutrition*, 88 (3), 32–43. (In Russian)] https://doi.org/10.24411/0042-8833-2019-10027
30. Al-Sharify, Z. T., Al-Najjar, S. Z., Naser, Z. A. Alsherfy, Z. A., Onyeaka, H. (2025). The impact of fluid flow on microbial growth and distribution in food processing systems. *Foods*, 14(3), Article 401. https://doi.org/10.3390/foods14030401
31. Бурак, Л. Ч. (2024). Ограничения и возможности современных технологий обеспечению микробиологической безопасности пищевых продуктов. *Известия высших учебных заведений. Пищевая технология*, 2–3(396), 6–13. [Burak, L. Ch. (2024). Limitations and possibilities of modern technologies for ensuring microbiological safety of food products. *Izvestiya Vuzov. Food Technology*, 2–3(396), 6–13. (In Russian)] https://doi.org/10.26297/0579-3009.2024.2-3.1
32. Oh, H., Lee, J. (2024). Psychrotrophic bacteria threatening the safety of animal-derived foods: Characteristics, contamination, and control strategies. *Food Science of Animal Resources*, 44(5), 1011–1027. https://doi.org/10.5851/kosfa.2024.e70
33. Liu, M., Ding, Y., Ye, Q., Wu, S., Gu, Q., Chen, L. et al. (2024). Cold-tolerance mechanisms in foodborne pathogens: *Escherichia coli* and *Listeria monocytogenes* as examples. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 65(11), 2031–2045. https://doi.org/10.1080/10408398.2024.2322141
34. Jang, H., Lee, D., Yoon, B. (2024). Development of a blockchain-based food safety system for shared kitchens. *Systems*, 12(11), Article 509. https://doi.org/10.3390/systems12110509

35. Chhetri, K. B. (2024). Applications of artificial intelligence and machine learning in food quality control and safety assessment. *Food Engineering Reviews*, 16(1), 1–21. https://doi.org/10.1007/s12393-023-09363-1
36. Sreevathsan, S., Bhavana, B. K., Debnath, S., Mudliar, S. N. (2023). Advanced computational tools for enhanced food quality and safety. Chapter in a book: Engineering Aspects of Food Quality and Safety. Springer, 2023. https://doi.org/10.1007/978-3-031-30683-9_8
37. Abouhagger, A., Celiešiūtė-Germanienė, R., Bakute, N., Stirke, A., Melo, W. C. M. A. (2024). Electrochemical biosensors on microfluidic chips as promising tools to study microbial biofilms: A review. *Frontiers in Cellular and Infection Microbiology*, 14, Article 1419570. https://doi.org/10.3389/fcimb.2024.1419570
38. Srivastav, A. K., Das, P., Srivastava, A. K. (2024). Precision agriculture and environmental monitoring. Chapter in a book: Biotech and Io T. Apress, 2024. https://doi.org/10.1007/979-8-8688-0527-1_7
39. Hooda, A., Vikranta, U., Duary, U. (2025). Principles of food dairy safety: Challenges and opportunities. Chapter in a book: Engineering Solutions for Sustainable Food and Dairy Production. Springer, 2025. https://doi.org/10.1007/978-3-031-75834-8_2
40. Bosona, T., Gebresenbet, G. (2023). The role of blockchain technology in promoting traceability systems in agri-food production and supply chains. *Sensors*, 23(11), Article 5342. https://doi.org/10.3390/s23115342
41. Chowdhury, M. A. H., Reem, C. S. A., Ashrafudoulla, Md., Rahman, Md. A., Shaila, S., Jie-won Ha, A. et al. (2025). Role of advanced cleaning and sanitation techniques in biofilm prevention on dairy equipment. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 24(3), Article e70176. https://doi.org/10.1111/1541-4337.70176
42. Ayısı Larbı, C., Osei, S. A. (2024). Reduction of losses and wastage in seafoods: The role of smart tools and biosensors based on artificial intelligence. *Journal of AI*, 8(1), 14–44. https://doi.org/10.61969/jai.1394542
43. Flores-Iwasaki, M., Guadalupe, G. A., Pachas-Caycho, M., Chapa-Gonza, S., Mori-Zabarburú, R. C., Guerrero-Abad, J. C. (2025). Internet of things (IoT) sensors for water quality monitoring in aquaculture systems: A systematic review and bibliometric analysis. *AgriEngineering*, 7(3), Article 78. https://doi.org/10.3390/agriengineering7030078
44. Pham, C., Nguyen, T.-T., Adamopoulos, A., Tait, E. (2022). Blockchain-enabled traceability in sustainable food supply chains: A case study of the pork industry in Vietnam. Chapter in a book: Information Systems Research in Vietnam: A Shared Vision and New Frontiers. Springer, 2022. https://doi.org/10.1007/978-981-19-3804-7_5
45. Vu, T. T., Trinh, H. H. H. (2021). Blockchain technology for sustainable supply chains of agri-food in Vietnam: A SWOT analysis. *Science and Technology Development Journal: Economics-Law and Management*, 5(1), 1278–1289. https://doi.org/10.32508/stdjelm.v5i1.675
46. Бурак, Л. Ч., Ермошина, Т. В., Саманкова, Н. В. (2025). Устойчивое производство. Концепция качества 4.0. *Фундаментальные исследования*, 9, 81–90. [Burak, L. Ch., Ermoshina, T. V., Samankova, N. V. (2025). Sustainable production. Quality concept 4.0. *Fundamental Research*, 9, 81–90. (In Russian)] https://doi.org/10.17513/fr.43905
47. Hussain, M., Zou, J., Zhang, H., Zhang, R., Chen, Z., Tang, Y. (2022). Recent progress in spectroscopic methods for the detection of foodborne pathogenic bacteria. *Biosensors*, 12(10), Article 869. https://doi.org/10.3390/bios12100869
48. Cheng, M.-F., Mukundan, A., Karmakar, R., Valappil, M. A. E., Jouhar, J., Wang, H.-C. (2025). Modern trends and recent applications of hyperspectral imaging: A review. *Technologies*, 13(5), Article 170. https://doi.org/10.3390/technologies13050170
49. Xie, J., Qu, S., Xu, M. (2024). Mapping water scarcity risks in global supply chain networks. *International Journal of Logistics: Research and Applications*, 27(12), 2541–2555. https://doi.org/10.1080/13675567.2024.2330591
50. Unger, P., Sekhon, A. S., Chen, X., Michael, M. (2022). Developing an affordable hyperspectral imaging system for rapid identification of *Escherichia coli* O157: H7 and *Listeria monocytogenes* in dairy products. *Food Science and Nutrition*, 10(4), 1175–1183. https://doi.org/10.1002/fsn3.2749
51. Aly, S. M., Fathi, M. (2024). Advancing aquaculture biosecurity: A scientometric analysis and future outlook for disease prevention and environmental sustainability. *Aquaculture International*, 32(7), 8763–8789. https://doi.org/10.1007/s10499-024-01589-y
52. Fouda, A., Abdel-Rahman, M. A., Eid, A. M., Selim, S., Ejaz, H., Alruwaili, M. et al. (2024). Investigating the potential of green-fabricated zinc oxide nanoparticles to inhibit the foodborne pathogenic bacteria isolated from spoiled fruits. *Catalysts*, 14(7), Article 427. https://doi.org/10.3390/catal14070427
53. Falkovskaya, A., Gowen, A. (2020). Literature review: Spectral imaging applied to poultry products. *Poultry Science*, 99(7), 3709–3722. https://doi.org/10.1016/j.psj.2020.04.013
54. Fagbemi, O. A., Essuah, M., Ugwu, D. C., Ajibola, A. B., Julius, S. O., Onyeyili, I. N. et al. (2025). Nanobiotechnology-driven innovations for tackling antimicrobial resistance. *World Journal of Biology Pharmacy and Health Sciences*, 21(2), 300–328. https://doi.org/10.30574/wjbphs.2025.21.2.0093
55. Arthur, M., Afari, E. L., Alexa, E.-A., Zhu, M.-J., Gaffney, M. T., Celayeta, J. M. F. et al. (2025). Recent advances in examining the factors influencing the efficacy of biocides against *Listeria monocytogenes* biofilms in the food industry: A systematic review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 24(1), Article e70083. https://doi.org/10.1111/1541-4337.70083
56. Rugji, J., Erol, Z., Taşçı, F., Musa, L., Hamadani, A., Gündemir, M. G. et al. (2024). Utilization of AI — reshaping the future of food safety, agriculture, and food security — a critical review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 65(26), 5136–5180. https://doi.org/10.1080/10408398.2024.2430749
57. Zhang, J., Huang, H., Song, G., Huang, K., Luo, Y., Liu, Q. et al. (2022). Intelligent biosensing strategies for rapid detection in food safety: A review. *Biosensors and Bioelectronics*, 202, Article 114003. https://doi.org/10.1016/j.bios.2022.114003
58. Singh, P., Pandey, V. K., Singh, R., Negi, P., Maurya, S. N., Rustagi, S. (2025). Substantial enhancement of overall efficiency and effectiveness of the pasteurization and packaging process using artificial intelligence in the food industry. *Food and Bioprocess Technology*, 18(2), 1125–1140. https://doi.org/10.1007/s11947-024-03527-5
59. Neethirajan, S. (2024). Net zero dairy farming — Advancing climate goals with big data and artificial intelligence. *Climate*, 12(2), Article 15. https://doi.org/10.3390/cli12020015
60. Evans, E. W., Bulochova, V., Jayal, A., Haven-Tang, C. (2023). Attitudes towards using artificial intelligence to determine real-time hand hygiene compliance in the food sector. *Food Control*, 145, Article 109439. https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2022.109439
61. Naseem, S., Rizwan, M. (2025). The role of artificial intelligence in advancing food safety: A strategic path to zero contamination. *Food Control*, 175, Article 111292. https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2025.111292
62. Dharmarathne, G., Abekoon, A. M. S. R., Bogahawaththa, M., Alawatugoda, J., Meddage, D. P. P. (2025). A review of machine learning and Internet-of-Things on the water quality assessment: Methods, applications, and future trends. *Results in Engineering*, 26, Article 105182. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.105182
63. Das, P., Nath, N. K., Kumar, N. K., Mishra, L. R., Suryawanshi, S., Gautam, V. K. (2024). Future of water management in India: Emerging role of IoT, AI, and data analytics. Chapter in a book: Integrated Management of Water Resources in India: A Computational Approach. Water Science and Technology Library. Springer, 2024. https://doi.org/10.1007/978-3-031-62079-9_22
64. Radhika, K., Mohammed, S., Tadepalli, S. K., Puvvula, K. (2024). Food supply chain management by leveraging AI, IoT, and blockchain technologies. Chapter in a book: The Future of Agriculture: IoT, AI and Blockchain Technology for Sustainable Farming. Bentham Science Publishers, 2024. https://doi.org/10.2174/9789815274349124010l
65. Bhagavan, S., Gharibi, M., Rao, P. (December 15–18, 2021). *Fedsmarteum: Secure federated matrix factorization using smart contracts for multi-cloud supply chain*. 2021 IEEE International Conference on Big Data (Big Data). IEEE, 2021. https://doi.org/10.1109/BigData52589.2021.9671789
66. Ashoka, P., Devi, B. R., Sharma, N., Behera, M., Gautam, A., Jha, A. et al. (2024). Artificial intelligence in water management for sustainable farming: A review. *Journal of Scientific Research and Reports*, 30(6), 511–525. https://doi.org/10.9734/jsrr/2024/v30i62068
67. Reem, C. S. A., Chowdhury, M. A. H., Ashrafudoulla, M., Ha, S.-D. (2025). Leveraging blockchain and AI for biofilm control in food processing environments. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 24(5), Article e70261. https://doi.org/10.1111/1541-4337.70261
68. Dakhia, Z., Russo, M., Merenda, M. (2025). AI-enabled IoT for food computing: Challenges, opportunities, and future direction. *Sensors*, 25(7), Article 2147. https://doi.org/10.3390/s25072147
69. Kumari, A., Gaikwad, K. K. (2025). Data carriers for real-time tracking and monitoring in smart, intelligent packaging applications: A technological review. *Next Materials*, 8, Article 100591. https://doi.org/10.1016/j.nxmate.2025.100591
70. Cruz, E., Hidalgo-Rodriguez, M., Acosta-Reyes, M., Rangel, J. C., Boniche, K., Gonzalez-Olivardia, F. (2025). ACMSPT: Automated counting and monitoring system for poultry tracking. *AgriEngineering*, 7(3), Article 86. https://doi.org/10.3390/agriengineering7030086
71. Sobhan, A., Hossain, A., Wei, L., Muthukumarappan, K., Ahmed, M. (2025). IoT-enabled biosensors in food packaging: A breakthrough in food safety for monitoring risks in real time. *Foods*, 14(8), Article 1403. https://doi.org/10.3390/foods14081403
72. Jin, G., Jiang, Z., Sun, Y., Liu, S., Wu, F. (2025). Intelligent clean-in-place (CIP) system in beverage (healthy water) cleaner production. *Food Control*, 168, Article 110877. https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2024.110877
73. Neethirajan, S. (2025). Safeguarding digital livestock farming: A comprehensive cybersecurity roadmap for dairy and poultry industries. *Frontiers in Big Data*, 8, Article 1556157. https://doi.org/10.3389/fdata.2025.1556157
74. Yin, B., Tan, G., Muhammad, R., Liu, J., Bi, J. (2025). AI-powered innovations in food safety from farm to fork. *Foods*, 14(11), Article 1973. https://doi.org/10.3390/foods14111973
75. Nashruddin, S. N. A. B. M., Salleh, F. H. M., Yunus, R. M., Zaman, R. (2024). Artificial intelligence-powered electrochemical sensor: Recent advances, challenges, and prospects. *Heliyon*, 10(18), Article e37964. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e37964
76. Ameer, S., Ibrahim, H., Yaseen, M. U., Kulsoom, F., Sher, M. (2023). Electrochemical impedance spectroscopy-based sensing of biofilms: A comprehensive review. *Biosensors*, 13(8), Article 777. https://doi.org/10.3390/bios13080777
77. Narayanasamy, D., Taufik, S., Mohd Azmi, A. F., Mohd Nor, S. A., Abdul Rashid, J. I. (2024). Modern technology advances of *Pseudomonas aeruginosa* based biosensor approach. *Biosensors and Bioelectronics*, 17, Article 100441. https://doi.org/10.1016/j.biosx.2024.100441
78. Hemdan, M., Abuelhaded, K., Shaker, A. A. S., Ashour, M. M., Abdelaziz, M. M., Dahab, M. I. et al. (2025). Recent advances in nano-enhanced biosensors: Innovations in design, applications in healthcare, environmental monitoring, and food safety, and emerging research challenges. *Sensing and Bio-Sensing Research*, 48, Article 100783. https://doi.org/10.1016/j.sbsr.2025.100783
79. Oh, S. E., Kim, J.-H., Kim, J.-Y., Ahn, J.-H. (2025). Food safety distribution systems using private blockchain: Ensuring traceability and data integrity verification. *Foods*, 14(8), Article 1405. https://doi.org/10.3390/foods14081405
80. Бурак, Л. Ч. (2023). Обзор разработок биоразлагаемых упаковочных материалов для пищевой промышленности. *Ползуновский вестник*, 1, 91–105. [Burak, L. Ch. (2023). Overview of developments of biodegradable packaging materials for the food industry. *Polzunovsky Vestnik*, 1, 91–105. (In Russian)] https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2023.01.012
81. Бурак, Л. Ч., Сапач, А. Н., Писарик, М. И. (2023). Интеллектуальная упаковка для овощей и фруктов, классификация и перспективы использования: Обзор предметного поля. *Health, Food and Biotechnology*, 5(1), 51–80. [Burak, L. C., Sapach, A. N., Pisarik M. I. (2023). Intelligent packaging for vegetables and fruits, classification and use prospects: Scoping review. *Health, Food and Biotechnology*, 5(1), 51–80. (In Russian)] https://doi.org/10.36107/hfb.2023.i1.s165
82. Periyasamy, T., Asrafali, S. P., Lee, J. (2025). Recent advances in functional biopolymer films with antimicrobial and antioxidant properties for enhanced food packaging. *Polymers*, 17(9), Article 1257. https://doi.org/10.3390/polym17091257

83. Duan, K., Onyeaka, H., Pang, G. (2024). Leveraging blockchain to tackle food fraud: Innovations and obstacles. *Journal of Agriculture and Food Research*, 18, Article 101429. https://doi.org/10.1016/j.jafr.2024.101429
84. Kremer, T., Murray, N., Buckley, J., Rowan, N. J. (2023). Use of real-time immersive digital training and educational technologies to improve patient safety during the processing of reusable medical devices: Quo vadis? *Science of the Total Environment*, 900, Article 165673. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165673
85. Highmore, C., Cooper, K., Parker, J., Robinson, J., Webb, J. S. (2025). Real-time detection of foodborne pathogens and biofilm in the food processing environment with Bactiscan, a macro-scale fluorescence device. *Journal of Food Protection*, 88(6), Article 100511. https://doi.org/10.1016/j.jfp.2025.100511
86. Roberts, S. C. H., Havill, N. L., Flores, R. M., Hendrix II, C. A., Williams, M. J., Feinn, R. S. et al. (2022). Disinfection of virtual reality devices in health care settings: In vitro assessment and survey study. *Journal of Medical Internet Research*, 24(12), Article e42332. https://doi.org/10.2196/42332
87. Hamilton, A. N., Gibson, K. E., Amalaradjou, M. A., Callahan, C. W., Millner, P. D., Ilic, S. et al. (2023). Cultivating food safety together: Insights about the future of produce safety in the U.S. controlled environment agriculture sector. *Journal of Food Protection*, 86(12), Article 100190. https://doi.org/10.1016/j.jfp.2023.100190
88. Yeganeh, L. N., Fenty, N. S., Chen, N. S., Simpson, A., Hatami, M. (2025). The future of education: A multi-layered metaverse classroom model for immersive and inclusive learning. *Future Internet*, 17(2), Article 63. https://doi.org/10.3390/fi17020063
89. Pizzi, F., Peters, F., Sorribes, E., Marín-Beltrán, I., Romera-Castillo, C., Grau, J. et al. (2025). Modulation of biofilm growth by shear and fluctuations in turbulent environments. *Scientific Reports*, 15(1), Article 12460. https://doi.org/10.1038/s41598-025-95822-0
90. Xue, R., Wang, Z., Li, G., Hall, P., Watson, N. J. (2025). Clean-in-place optimization using swirl pipe and ultrasonic monitoring. *Journal of Food Engineering*, 396, Article 112572. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2025.112572
91. Jafarzadeh, S., Yildiz, Z., Yildiz, P., Strachowski, P., Forough, M., Esmaeili, Y. et al. (2024). Advanced technologies in biodegradable packaging using intelligent sensing to fight food waste. *International Journal of Biological Macromolecules*, 261, Article 129647. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.129647
92. Ziani, I., Bouakline, H., El Guerraf, A., Marie-Laure Fauconnier, Sher, F. (2025). Integrating AI and advanced spectroscopic techniques for precision food safety and quality control. *Trends in Food Science and Technology*, 156, Article 104850. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2024.104850
93. Huang, Y., Guo, X., Wu, Y., Chen, X., Feng, L., Xie, N. et al. (2024). Nanotechnology's frontier in combatting infectious and inflammatory diseases: Prevention and treatment. *Signal Transduction and Targeted Therapy*, 9(1), Article 34. https://doi.org/10.1038/s41392-024-01745-z
94. Apoorva, S., Nguyen, N. T., Sreejith, K. R. (2024). Recent developments and future perspectives of microfluidics and smart technologies in wearable devices. *Lab on a Chip*, 24(7), 1833–1866. https://doi.org/10.1039/D4LC00089G
95. Kolikipogu, R., Shivaputra, E., Muniyandy, E., Maroor, J. P., Lakshmi, G. V. R., Konduri, B. et al. (2025). Improving food safety by IoT-based climate monitoring and control systems for food processing plants. *Remote Sensing in Earth Systems Sciences*, 8(2), 387–399. https://doi.org/10.1007/s41976-024-00190-4
96. Roussaki, I., Doolin, K., Skarmeta, A., Routis, G., Lopez-Morales, J. A., Claffey, E. et al. (2023). Building an interoperable space for smart agriculture. *Digital Communications and Networks*, 9(1), 183–193. https://doi.org/10.1016/j.dcan.2022.02.004
97. Mohd Jais, N. A., Abdullah, A. F., Mohd Kassim, M. S., Abd Karim, M. M., Muhadi, N. 'A. (2024). Improved accuracy in IoT-based water quality monitoring for aquaculture tanks using low-cost sensors: Asian seabass fish farming. *Heliyon*, 10(8), Article e29022. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e29022
98. Vedantam, K. S., Jain, S. K., Panwar, N. L., Sunil, J., Wadhawan, N., Kumar, A. (2024). Emergence of Internet of Things technology in food and agricultural sector: A review. *Journal of Food Process Engineering*, 47(8), Article e14698. https://doi.org/10.1111/jfpe.14698
99. Sunmola, F., Baryannis, G., Tan, A., Co, K., Papadakis, E. (2025). Holistic framework for blockchain-based halal compliance in supply chains enabled by artificial intelligence. *Systems*, 13(1), Article 21. https://doi.org/10.3390/systems13010021

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ	AUTHOR INFORMATION
Принадлежность к организации	**Affiliation**
Бурак Леонид Чеславович — доктор философии в области пищевых наук, кандидат технических наук, директор, Общество с ограниченной ответственностью «БЕЛРОСАКВА» 220118, Республика Беларусь, Минск, ул. Шаранговича, 19, офис 718 E-mail: leonidburak@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6613-439X * автор для контактов	**Leonid Ch. Burak**, PhD, Candidate of Technical Sciences, Director, BELROSAKVA Limited Liability Company 19, Sharangovich Str., Minsk, 220018, Republic of Belarus E-mail: leonidburak@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6613-439X * corresponding author
Завалей Андрей Петрович — начальник испытательной лаборатории, Совместное общество с ограниченной ответственностью «Ароматик» 222112, Республика Беларусь, Минская область, Дзержинск, ул. Колхозная, 1 E-mail: zavaley@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6565-5927	**Andrey P. Zavaley**, Head of Testing Laboratory, Joint Limited Liability Vompany "Aromatic" 1, Kolkhoznaya Str., Dzherzhinsk, Minsk Region, 222112, Republic of Belarus E-mail: zavaley@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6565-5927
Сапач Александр Николаевич — заместитель директора, Общество с ограниченной ответственностью «БЕЛРОСАКВА» 220118, Республика Беларусь, Минск, ул. Шаранговича, 19, офис 718 E-mail: aleksandr@belrosakva.by ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8579-2689	**Alexander N. Sapach**, Deputy Director, BELROSAKVA Limited Liability Company 19, Sharangovich Str., Minsk, 220018, Republic of Belarus E-mail: aleksandr@belrosakva.by ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8579-2689
Критерии авторства	**Contribution**
Бурак Л. Ч.: концептуализация, разработка методологии исследования, научное руководство исследованием, проведение исследования, написание-рецензирование и редактирование рукописи; **Завалей А. П.**: проведение исследования, работа с программным обеспечением, проверка данных, написание и редактирование рукописи; **Сапач А. Н.**: анализ литературных источников по теме исследования, проведение исследования, написание и редактирование рукописи.	**Leonid Ch. Burak**: conceptualization, development of research methodology, scientific supervision of the research, conducting the research, writing and reviewing, manuscript editing; **Andrey P. Zavaley**: conducting research, working with software, checking data, writing and editing the manuscript; **Alexander N. Sapach**: analysis of literary sources on the research topic, conducting research, writing and editing the manuscript.
Конфликт интересов	**Conflict of interest**
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.	The authors declare no conflict of interest.

DOI: https://doi.org/10.21323/2618-9771-2026-9-2-357-366

Поступила 27.05.2026
Поступила после рецензирования 26.06.2026
Принята в печать 29.06.2026
© Мечтаева Е. В., Васильев П. Н., Никитина Н. А., Журавлева А. З., Ситнов В. Ю., 2026
https://www.fsjour.com/jour
Научная статья
Открытый доступ

ВАКУУМНАЯ И КОНВЕКЦИОННАЯ СУШКА НАСЕКОМЫХ ВИДОВ *TENEBRIO MOLITOR* И *ACHETA DOMESTICUS*

Мечтаева Е. В.*, Васильев П. Н., Никитина Н. А., Журавлева А. З., Ситнов В. Ю.
Всероссийский научно-исследовательский институт пищевых добавок, Санкт-Петербург, Россия

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *сверчок домашний, большой мучной хрущак, мука из насекомых, сушка*

АННОТАЦИЯ
Насекомые — перспективный источник белка и липидов для пищевых и кормовых целей. Наиболее распространенной формой их использования является мука, получаемая путем высушивания и измельчения. При этом способ и условия переработки насекомых существенно влияют на физико-химические, микробиологические и органолептические характеристики конечного продукта. В данном исследовании проведено сравнение конвекционной и вакуумной сушки личинок большого мучного хрущака (*Tenebrio molitor*) и сверчка домашнего (*Acheta domesticus*) при температурах 50 °С, 80 °С и 105 °С. Оценено влияние способа и условий сушки на скорость процесса, внешний вид и микробиологическую безопасность получаемого продукта. Установлено, что повышение температуры сушки сокращало продолжительность процесса для обоих видов насекомых. При 50 °С вакуумная сушка образцов *A. domesticus* обеспечивала более быстрое достижение влажности менее 5 % по сравнению с конвекционным способом. Повышение температуры конвекционной сушки сопровождалось выраженным потемнением муки из личинок *T. molitor*, тогда как для *A. domesticus* изменение цвета было незначительным. Вакуумная сушка при всех изученных режимах позволяла лучше сохранить исходный цвет и форму насекомых. Сушка при температуре 105 °С обеспечивала получение продукта, соответствующего требованиям микробиологической безопасности. Таким образом, выбор метода сушки должен определяться целевым назначением продукта: для целых насекомых оптимальна вакуумная сушка, обеспечивающая сохранение товарного вида продукта, тогда как для производства муки допустимо использование более экономичной конвекционной сушки при высоких температурах, гарантирующих микробиологическую чистоту.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Работа выполнена в рамках государственных заданий ВНИИПД — филиал ФГБНУ «ФНЦ пищевых систем им. В. М. Горбатова» РАН по темам FGUS-2024-0010 и FGUS-2025-0005.

Received 27.05.2026
Accepted in revised 26.06.2026
Accepted for publication 29.06.2026
© Mechtaeva E. V., Vasilev P. N., Nikitina N. A., Zhuravleva A. Z., Sitnov V. Yu., 2026
Available online at https://www.fsjour.com/jour
Original article
Open access

VACUUM AND CONVECTION DRYING OF *TENEBRIO MOLITOR* AND *ACHETA DOMESTICUS* INSECTS

Elizaveta V. Mechtaeva*, Platon N. Vasilev, Natalia A. Nikitina, Aigul Z. Zhuravleva, Veniamin Yu. Sitnov
All-Russian Research Institute for Food Additives, Saint Petersburg, Russia

KEYWORDS: *house cricket, yellow mealworm, insect flour, drying*

ABSTRACT
Insects are a promising source of protein and lipids for food and feed purposes. The most common form of their use is flour obtained by drying and grinding. The method and conditions of insect processing significantly affect the physicochemical, microbiological, and organoleptic characteristics of the final product. This study compared convection and vacuum drying of yellow mealworm (*Tenebrio molitor*) and house cricket (*Acheta domesticus*) larvae at temperatures of 50 °C, 80 °C, and 105 °C. The influence of the drying method and conditions on the process rate, appearance, and microbiological safety of the resulting product was assessed. Increasing the drying temperature was found to reduce the drying time for both insect species. At temperature 50 °C, vacuum drying of *A. domesticus* samples achieved a moisture of less than 5 % more quickly than the convection method. Increasing the convection drying temperature led to pronounced darkening of *T. molitor* larval flour, whereas the color change for *A. domesticus* was minor. Vacuum drying under all studied conditions better preserved the original color and shape of the insects. Drying at temperature 105 °C yielded a product that met microbiological safety requirements. Therefore, the choice of drying method should be determined by the intended use of the product: vacuum drying is optimal for whole insects, preserving their marketable appearance, whereas for flour production, the more economical convection drying at high temperatures, which ensures microbiological purity, is acceptable.

FUNDING: The work was carried out within the framework of the state assignments of the All-Russian Research Institute for Food Additives — Branch of V. M. Gorbatov Federal Research Center for Food Systems of RAS on the topics FGUS-2024-0010 and FGUS-2025-0005.

1. Введение

Постоянный рост численности населения планеты и необходимость обеспечения его продуктами питания приводят к увеличению нагрузки на сельскохозяйственный сектор. Интенсивное сельское хозяйство оказывает значительное негативное влияние на окружающую среду: вызывает эрозию почв, вырубку лесов, увеличение количества парниковых газов, а также приводит к утрате биоразнообразия [1,2]. Одним из путей решения этой проблемы является поиск альтернативных источников питательных веществ, более экологичных и требующих меньшего количества ресурсов для производства. Таким источником могут стать насекомые, определенные виды которых богаты белками и жирами и обладают высокой пищевой ценностью [3,4]. Культивирование насекомых и переработка их в продукты питания требует меньше электроэнергии, воды и территории, чем молочное и мясное производство [5,6]. Усвояемость белков насекомых может достигать 99 %, что сопоставимо с усвояемостью белков животного происхождения [7–9].

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: **Мечтаева, Е. В., Васильев, П. Н., Никитина, Н. А., Журавлева, А. З., Ситнов, В. Ю.** (2026). Вакуумная и конвекционная сушка насекомых видов *Tenebrio molitor* и *Acheta domesticus*. *Пищевые системы*, 9(2), 357–366. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2026-9-2-357-366

FOR CITATION: **Mechtaeva, E. V., Vasilev, P. N., Nikitina, N. A., Zhuravleva, A. Z., Sitnov, V. Yu.** (2026). Vacuum and convection drying of *Tenebrio molitor* and *Acheta domesticus* insects. *Food Systems*, 9(2), 357–366. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2026-9-2-357-366

Большой мучной хрущак (*Tenebrio molitor* L., Coleoptera: Tenebrionidae) и домашний сверчок (*Acheta domesticus* L., Orthoptera: Gryllidae) — одни из наиболее перспективных насекомых для пищевых целей. Личинки *T. molitor* содержат 40,2–63,3 % белка на сухое вещество и 20,0–40,6 % жира, а имаго могут использоваться для получения хитина и хитозана [3,10,11]. *A. domesticus* также характеризуется высоким содержанием белка (48,9–70,0 % на сухое вещество) и жира (8,4–26,6 % на сухое вещество) [3,7]. На территории ЕС, а также ряда других стран большой мучной хрущак и домашний сверчок признаны съедобными насекомыми и разрешены для употребления в пищу человеком [2,8,12–15]. Однако, несмотря на все достоинства использования насекомых в продуктах питания, согласно опросам потребителей, такой продукт часто оценивается негативно [16]. В основном это связано с неофобией и неприятием, которое вызывает внешний вид насекомых у потребителей [4,15], а также с опасением по поводу безопасности употребления насекомых в пищу [17]. Эффективным способом снижения неприятия потребителей является переработка насекомых, в частности в муку, и включение ее в состав привычных продуктов питания, например, мучных кондитерских и хлебобулочных изделий [3,4].

Насекомые как сырье для пищевой промышленности должны соответствовать требованиям безопасности, перечень которых определяется нормативными документами различных стран, например ТР ТС 021/2011[1] и ЕС 2017/2470[2]. Среди таких требований — отсутствие токсичных компонентов в составе, микробиологическая безопасность и др. При этом отсутствие в насекомых, например, тяжелых металлов в большей степени обеспечивается контролем за рационом их питания; однако микробиологические показатели в основном определяются способом обработки биомассы насекомых перед использованием.

Наиболее часто в обработку биомассы насекомых входят умерщвление, сушка, в ряде случаев обеззараживание и измельчение. Уже на стадии умерщвления можно значительно снизить микробиологическую обсемененность продукта. Например, в работе [18] показано, что умерщвление личинок черной львинки высушиванием или бланшированием (кратковременной обработкой горячей водой) снижает микробную нагрузку получаемого продукта в сравнении с замораживанием, выдерживанием в бескислородных условиях, обработкой повышенным давлением. Кроме того, авторы установили, что бланширование, одновременно являясь наиболее эффективным способом деконтаминации личинок, приводит к меньшему потемнению сравнительно с высушиванием [18]. Несмотря на указанные выше преимущества, такой способ умерщвления считается менее гуманным, чем замораживание [19]. Замораживание также обеспечивает возможность длительного хранения [20].

Для снижения бактериологической обсемененности биомассу насекомых можно обеззараживать перед использованием, например, посредством температурной обработки, промывки, маринования, стерилизации рентгеновским излучением [21,22]. Однако наиболее распространенным способом обработки биомассы насекомых является сушка. Способ и условия обработки, помимо микробиологических характеристик, влияют на органолептические. В работе [23] исследовались личинки большого мучного хрущака, лиофилизированные при температуре минус 40 °С, а также личинки, подвергнутые конвекционной сушке при 70 °С и 90 °С. Авторами установлено, что данные методы позволяют получить продукты, соответствующие требованиям микробиологической безопасности. Однако конвекционная сушка также способствует значительному потемнению продукта, в то время как лиофильная сушка позволяет сохранить внешний вид насекомых, но требует значительно больше времени [23,24]. Микроволновая сушка позволяет эффективно снижать микробную нагрузку, но требует наличия специального оборудования и приводит к потемнению насекомых, хотя в меньшей степени, чем конвекционная сушка [24,25].

Таким образом, подбор оптимальных условий обработки и сушки насекомых является одним из наиболее важных факторов для их использования. Ключевыми параметрами, на основании которых необходимо выбирать режим сушки, являются эффективность сушки, безопасность получаемого продукта, а также органолептические характеристики, в частности цвет. Кроме этого, важным экономическим показателем является времязатратность процесса, поэтому требуется оценка скорости сушки.

Целью данного исследования являлось изучение влияния режимов сушки на цвет и микробиологические показатели большого мучного хрущака и сверчка домашнего, а также муки на их основе.

2. Объекты и методы

2.1. Культивирование насекомых

Личинки большого мучного хрущака и сверчок домашний были взяты из маточных колоний насекомых в инсектарии Всероссийского НИИ пищевых добавок. Большой мучной хрущак культивировался при температуре 25 ± 2 °С и относительной влажности воздуха 50 ± 10 %. Кормовым субстратом служили пшеничные отруби (пищевая ценность на 100 г продукта: белки — 16,0 г, жиры — 4,0 г, углеводы — 65,0 г) с морковью в качестве источника влаги. Сверчок выращивался при температуре 28 ± 2 °С и относительной влажности воздуха 60 ± 10 %. Кормовым субстратом служила рыбная мука (пищевая ценность на 100 г продукта: белки — 69,3 г, жиры — 10,7 г, углеводы — 0,3 г), смешанная с пшеничными отрубями в соотношении 1:10. Для поения использовалась деионизованная вода.

2.2. Подготовка образцов

Личинки большого мучного хрущака возрастом 2–2,5 месяца, а также домашнего сверчка на стадиях предимаго и имаго (возраст 2,5–3 месяца) отделялись от кормового субстрата и подвергались голоданию в течение 2 ч, после чего замораживались при температуре минус 20 °С. Перед процессом сушки насекомые вынимались из морозильной камеры, промывались и бланшировались в деионизованной воде при температуре 95–98 °С в течение 30 с. После чего излишки влаги удалялись с помощью фильтровальной бумаги.

2.3. Сушка образцов

Сушка проводилась в конвекционном сушильном шкафу UF110plus (Memmert GmbH & Co.KG, Германия) и вакуумном сушильном шкафу Vacuum Oven OV-12 (Jeio Tech, Корея) с насосом MVP 6 (Woosung Vacuum Co., Ltd, Корея) при температурах 50 °С, 80 °С и 105 °С. Для определения оптимального времени и скорости сушки при различных условиях были проведены две группы исследований.

В ходе первой группы исследований 10–15 образцов бланшированных насекомых массой 3–8 г, распределенных в один слой на стеклянных чашках Петри, помещались в сушильный шкаф и выдерживались при постоянной температуре. Каждый час один образец вынимался и взвешивался для определения потери массы и расчета скорости сушки. Для каждого режима сушки эксперимент проводился не менее 8 ч. Вторая группа исследований проводилась аналогично, однако образцы насекомых вынимались и взвешивались каждые 15–30 минут, и эксперимент проводился не более 5 ч.

На основании полученных данных рассчитывалось влагосодержание (M_t) образцов насекомых в различные моменты времени по формуле [26]:

$$M_t = \frac{m_t - m_{dry}}{m_{dry}}, \quad (1)$$

где: M_t — влагосодержание образца в момент времени t; m_t — масса образца в момент времени t, г; m_{dry} — сухая масса образца, г.

Массовая доля влаги, оставшейся в образце (*MR*), вычислялась по формуле [27]:

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e}, \quad (2)$$

где: *MR* — массовая доля влаги в образце в момент времени t относительно изначального количества влаги; M_t — влагосодержание образца в момент времени t; M_0 — исходное влагосодержание образца; M_e — равновесное влагосодержание образца (принято равным 0 [27,28]).

Скорость сушки (*DR*) определялась по формуле [26]:

$$DR = \frac{M_t - M_{t+\Delta t}}{\Delta t}, \quad (3)$$

где: *DR* — скорость сушки, 1/ч; M_t — влагосодержание образца в момент времени t; $M_{t+\Delta t}$ — влагосодержание образца в момент времени $t+\Delta t$, г; Δt — временной интервал отбора образцов, ч.

2.4. Влажность

Для определения содержания влаги предварительно взвешенные образцы высушивались при температуре 105 °С до постоянной массы. Влажность (*W*) рассчитывалась по формуле:

[1] Технический регламент Таможенного Союза ТР ТС 021/2011 «О безопасности пищевой продукции». Принят Решением Комиссии Таможенного союза от 9 декабря 2011 г. № 880. (ред. от 22 апреля 2024 года). Электронный ресурс https://docs.cntd.ru/document/902320560 Дата доступа 22.05.2026

[2] Commission Implementing Regulation (EU) 2017/2470 of 20 December 2017 establishing the Union list of novel foods in accordance with Regulation (EU) 2015/2283 of the European Parliament and of the Council on novel foods Retrieved from https://eur-lex.europa.eu/eli/reg_impl/2017/2470/oj/eng/pdf Accessed May 22, 2026

$$W = \frac{m_0 - m_{dry}}{m_0} \times 100, \quad (4)$$

где: W — влажность образца, %; m_0 — начальная масса образца, г; m_{dry} — масса образца после сушки, г.

Влажность определялась в трех повторностях, рассчитывались среднее арифметическое и доверительный интервал ($\alpha = 0{,}05$).

2.5. Цветовые характеристики

Внешний вид и цвет насекомых, высушенных при различных условиях, а также муки из них оценивались по фотографиям с помощью программного обеспечения Adobe Photoshop CS6 согласно методу, описанному в [29]. Образцы замороженных, бланшированных, а также высушенных насекомых фотографировались, после чего измельчались в течение 30 с до получения однородного порошка с помощью измельчителя MT-2163 (MARTA, Китай) и повторно фотографировались. Фотографирование осуществлялось в фотобоксе Grifon LED 440 (Grifon, Китай) при максимальной интенсивности освещения (цветовая температура 5400 K, яркость 5000).

Цветовые характеристики образцов, а именно значения показателей L^* (lightness), a^* (redness), b^* (yellowness), определялись в 15 различных точках фотографических изображений. Затем рассчитывались среднее значение и доверительный интервал ($\alpha = 0{,}05$) для этих показателей с использованием программного обеспечения Microsoft Office Excel 2016. Кроме этого, статистическая значимость разницы между параметрами образцов насекомых, высушенных при различных температурах, оценивалась с помощью однофакторного дисперсионного анализа (ANOVA) в программном обеспечении RStudio. Различия считались значимыми при $p < 0{,}05$. В этом случае также проводилось попарное сравнение разницы между величинами, полученными в каждом эксперименте, методом Тьюки (Tukey's HSD). Результаты теста обозначены с помощью буквенных индексов.

Остальные параметры рассчитывались с использованием средних значений показателей L^*, a^*, b^*. Степень изменения цвета образца в результате сушки определялась при помощи уравнения [30]:

$$\Delta E_{Lab} = \sqrt{\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2}}. \quad (5),$$

где: ΔE_{Lab} — степень изменения цвета; ΔL^* — разность между lightness анализируемого образца и контрольного; Δa^* — разность между redness анализируемого образца и контрольного; Δb^* — разность между yellowness анализируемого образца и контрольного.

Насыщенность (Ch) рассчитывалась по формуле [31]:

$$Ch = \sqrt{(a^{*2} + b^{*2})}. \quad (6)$$

Оттенок (H) определялся по формуле:

$$H = arctg(\frac{b^*}{a^*}). \quad (7)$$

Индекс потемнения (BI) рассчитывался по формуле:

$$BI = \frac{|100 \times (x - 0{,}31)|}{0{,}17}, \quad (8)$$

$$x = \frac{(a^* + 1{,}75L^*)}{(5{,}654L^* + a^* - 3{,}012b^*)}. \quad (9)$$

2.6. Микробиологические показатели

Для изучения влияния различных режимов сушки на безопасность муки из насекомых как потенциального продукта питания или его компонента оценивались основные микробиологические показатели образцов. Мука была получена путем измельчения до однородного состояния насекомых, высушенных в течение выбранного для каждой температуры времени сушки. Также были измельчены и проанализированы замороженные и бланшированные насекомые. Количество мезофильных аэробных и факультативно-анаэробных микроорганизмов (КМАФАнМ) определяли путем подсчета колоний, полученных после посева разведений образца (10^2 и 10^3), приготовленных в пептонно-солевом растворе, на мясопептонный агар. Культивирование проводили при температуре (30 ± 1) °C в течение (72 ± 3) ч в соответствии с ГОСТ 10444.15-94[3]. Число плесневых грибов и дрожжей учитывали методом посева разведений образца (10^1 и 10^2) на агар Сабуро (25 ± 1 °C, 5 суток) (ГОСТ 10444.12-2013[4]).

Наличие *Listeria monocytogenes* определяли по ГОСТ 32031-2022[5]. Гомогенизированный в бульоне Фразера образец (25 г) инкубировался (37 ± 1 °C, 24 ± 1 ч), а затем культивировался на агаре Оттавиани и Агости (37 ± 1 °C, 48 ч). Определение *Salmonella* spp. проводилось по ГОСТ 31659-2012[6]. Обогащенный в забуференной пептонной воде образец (25 г) высевался на XLD-агар и культивировался при температуре 37 ± 1 °C в течение 18 ± 2 ч.

Определение нижеследующих микроорганизмов проводилось в навесках массой 1,0, 0,1 и 0,01 г (для *Bacillus cereus* навески 0,1 и 0,01 г), гомогенизированных в пептонно-солевом растворе. Бактерии группы кишечной палочки (БГКП) идентифицировались по ГОСТ 31747-2012[7] последовательной инкубацией в лаурилсульфат-триптозном бульоне и лактозном желчном бульоне с бриллиантовым зеленым (37 ± 1 °C, 24 ± 2 ч). Для определения наличия *Escherichia coli* дополнительно образцы инкубировались на триптозном бульоне с реактивом Ковача (36 ± 1 °C, 24 ± 2 ч) (ГОСТ 30726-2001[8]). Коагулазоположительные стафилококки определялись по ГОСТ 31746-2012[9] посевом на агар Бэрда-Паркера с добавкой RPF (37 ± 1 °C, 48 ± 2 ч). Сульфитредуцирующие клостридии — посевом на железосульфитный агар (37 ± 1 °C, 24 ± 2 ч) (ГОСТ 29185-2014[10]). *B. cereus* идентифицировался на MYP-агаре (30 ± 1 °C, 18–24 ч) (ГОСТ 10444.8-2013[11]).

3. Результаты и обсуждение

3.1. Влажность и скорость сушки

На первом этапе исследования была проведена оценка времени, необходимого для достижения постоянной влажности образцов насекомых при использовании каждого из исследованных режимов сушки: конвекционной или вакуумной при 50 °C, 80 °C и 105 °C. Выбранные условия сушки затем использовались для получения образцов насекомых и муки из них для анализа цвета и микробиологических показателей. Продолжительность сушки, необходимая для достижения минимального содержания влаги, зависит от условий и метода сушки [28,32–34], от природы образца [28,33,35], его количества [28,36], исходной влажности [33] и предварительной обработки [37]. Поэтому выбранное в данной работе время сушки может потребовать корректировки при изменении каких-либо условий.

По полученным данным (Рисунок 1) было выбрано следующее время сушки образцов насекомых: 2 ч при 105 °C; 4 ч при 80 °C в конвекционном шкафу и 5 ч при высушивании в вакууме при той же температуре; для сушки при температуре 50 °C было выбрано минимальное время, за которое все образцы достигали влажности менее 5 % — 12 ч. Остаточная влажность 5 % примерно соответствует величине активности воды a_w = 0,4, которая обеспечивает безопасное и стабильное состояние продукта [32,37]. Для высушивания сверчка домашнего при температуре 50 °C в вакууме требовалось значительно меньшее время (3 ч), чем для большого мучного хрущака, однако для сравнения их характеристик сушка проводилась в течение одинакового времени — 12 ч. В Таблице 1 указаны условия, при которых высушивались образцы насекомых для получения муки и дальнейших анализов, а также влажность полученных образцов.

На втором этапе исследования была проведена дополнительная группа экспериментов при температурах 80 °C и 105 °C. Влажность насекомых в процессе сушки контролировалась каждые 15–30 мин (Рисунок 2). На основании данных об изменении влажности во время сушки была рассчитана скорость сушки и построены кривые зависимости DR от влагосодержания (Рисунок 3 и Рисунок 4).

[3] ГОСТ 10444.15-94 «Продукты пищевые. Методы определения количества мезофильных аэробных и факультативно-анаэробных микроорганизмов». М.: Стандартинформ, 2010. — 7 с.

[4] ГОСТ 10444.12-2013 «Микробиология пищевых продуктов и кормов для животных. Методы выявления и подсчета количества дрожжей и плесневых грибов». М.: Стандартинформ, 2014. — 15 с.

[5] ГОСТ 32031-2022 «Продукты пищевые. Методы выявления бактерий Listeria monocytogenes и других видов *Listeria* (*Listeria* spp.)». М.: Стандартинформ, 2022. — 37 с.

[6] ГОСТ 31659-2012 «Продукты пищевые. Метод выявления бактерий рода Salmonella». М.: Стандартинформ, 2014. — 26 с.

[7] ГОСТ 31747-2012 «Продукты пищевые. Методы выявления и определения количества бактерий группы кишечных палочек (колиформных бактерий)». М.: Стандартинформ, 2013. — 20 с.

[8] ГОСТ 30726-2001 «Продукты пищевые. Методы выявления и определения количества бактерий вида *Escherichia coli*». М.: Стандартинформ, 2010. — 8 с.

[9] ГОСТ 31746-2012 «Продукты пищевые. Методы выявления и определения количества коагулазоположительных стафилококков и *Staphylococcus aureus*». М.: Стандартинформ, 2013. — 30 с.

[10] ГОСТ 29185-2014 «Микробиология пищевых продуктов и кормов для животных. Методы выявления и подсчета сульфитредуцирующих бактерий, растущих в анаэробных условиях». М.: Стандартинформ, 2015. — 17 с

[11] ГОСТ 10444.8-2013 «Микробиология пищевых продуктов и кормов для животных. Горизонтальный метод подсчета презумптивных бактерий *Bacillus cereus*. Метод подсчета колоний при температуре 30 °C». М.: Стандартинформ, 2014. — 20 с.

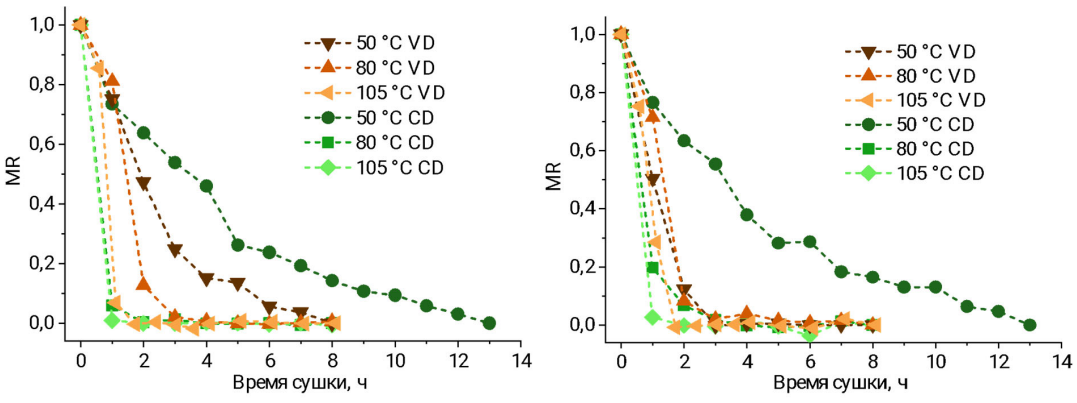


Рисунок 1. **Кривые сушки личинок *T. molitor* (а) и имаго *A. domesticus* (б) при различных условиях (влажность проверялась каждые 60 мин), VD — вакуумная сушка, CD — конвекционная сушка**

Figure 1. **Drying curves of *T. molitor* larvae (a) and *A. domesticus* imago (б) under different conditions (moisture was controlled every 60 min.), VD — vacuum drying, CD — convection drying**

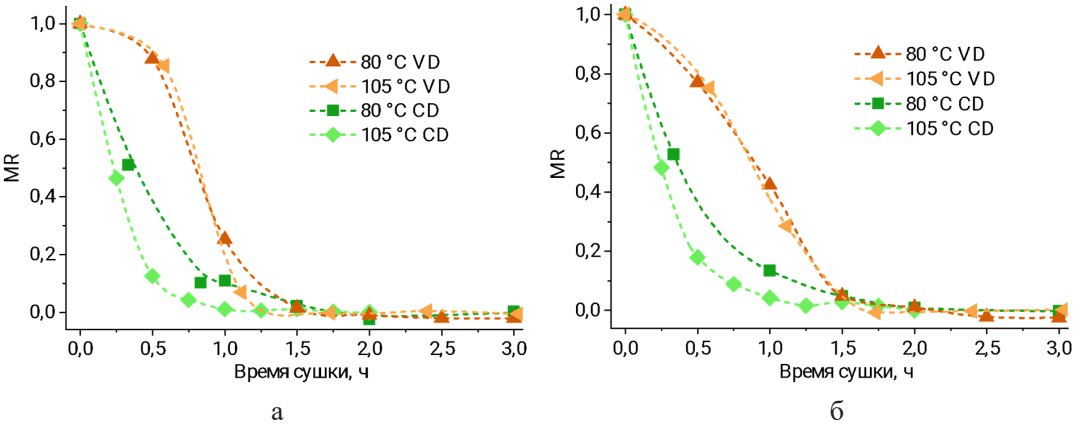


Рисунок 2. **Кривые сушки личинок *T. molitor* (а) и имаго *A. domesticus* (б) при различных условиях (влажность проверялась каждые 15–30 мин), VD — вакуумная сушка, CD — конвекционная сушка**

Figure 2. **Drying curves of *T. molitor* larvae (a) and *A. domesticus* imago (б) under different conditions (moisture was controlled every 15–30 min.), VD — vacuum drying, CD — convection drying**

Таблица 1. **Влажность личинок насекомых, высушенных при различной температуре в конвекционном и вакуумном сушильных шкафах (в виде среднего арифметического с доверительным интервалом (n = 3, α = 0,05))**

Table 1. **Moisture of insect larvae dried at different temperatures in the convection and vacuum drying ovens (as an arithmetic mean with confidence interval (n = 3, α = 0.05))**

Температура сушки, °C	Время сушки, ч	Влажность личинок *T. molitor*, %	Влажность имаго *A. domesticus*, %
–	0	63,0±0,3	72,4±0,9
Вакуумная сушка			
50	12	1,0±0,5	1,5±1,4
80	5	0,2±0,2	0,1±0,4
105	2	0,0±0,3	0,0±0,4
Конвекционная сушка			
50	12	2,0±0,3	4,2±0,3
80	4	0,0±0,6	0,6±0,6
105	2	0,0±0,3	0,0±0,9

Сушка включает в себя процессы переноса тепла и массы. Высушиваемые биологические образцы обычно рассматриваются как пористая среда, в которой жидкость диффундирует к поверхности и затем испаряется [28]. В связи с этим выделяют две основные стадии сушки [27]. На первой стадии (период постоянной скорости сушки) происходит испарение свободной влаги с поверхности образца [27]. Вторая стадия (период падающей скорости) наступает, когда влага с поверхности полностью испарилась и скорость процесса начинает определяться скоростью диффузии влаги из глубины образца к поверхности [27]. Период постоянной скорости сушки часто может отсутствовать [26,34,38]. Одновременно с этим в начале процесса может наблюдаться период, соответствующий нагреву образца и вызванному им росту скорости сушки [26,27,38].

Согласно полученным данным, при конвекционной сушке при температурах 80 °C и 105 °C влажность образцов насекомых быстро уменьшалась сразу после начала процесса (Рисунок 2). Скорость сушки монотонно убывала (Рисунок 3), периода постоянной скорости сушки или ее роста не наблюдалось. Это указывает на то, что сушка исследованных насекомых контролировалась диффузионными процессами [27,34,39]. При конвекционной сушке *T. molitor* и *A. domesticus* DR увеличивалась с ростом температуры. Аналогичные зависимости наблюдаются для различных биологических образцов [26,36,38–40]. Авторы [26] указывают на рост скорости сушки личинок *T. molitor* с ростом температуры с 50 °C до 70 °C и отсутствие периода постоянной скорости сушки. Однако, по полученным в [26] данным, при температурах 60 °C и 70 °C наблюдался период роста скорости сушки, который авторы связывают с нагревом образцов.

В процессе вакуумной сушки при температурах 80 °C и 105 °C (Рисунок 2) были получены кривые сушки другого типа [28]. В начале наблюдался период роста DR (Рисунок 3), который связан с медленным нагревом образца в исследуемых условиях. Аналогичные кривые сушки *A. domesticus* при 90 °C и 110 °C получены в [36] при высушивании сверчков, расположенных в несколько слоев. Данные об изменении температуры образцов в процессе обработки показали, что расположение в несколько слоев значительно замедляло их нагрев [36]. Скорость вакуумной сушки при температурах 80 °C и 105 °C существенно не различалась (Рисунок 3).

Понижение температуры сушки до 50 °C приводило к значительному уменьшению скорости как вакуумной, так и конвекционной сушки (Рисунок 4а). В начале вакуумной сушки DR менялась мало, что может быть связано как с нагревом образца, так и с более медленным (по сравнению с 80 °C и 105 °C) испарением воды с поверхности образца. Снижение температуры способствует увеличению вязкости воды и уменьшению подвижности молекул, что снижает

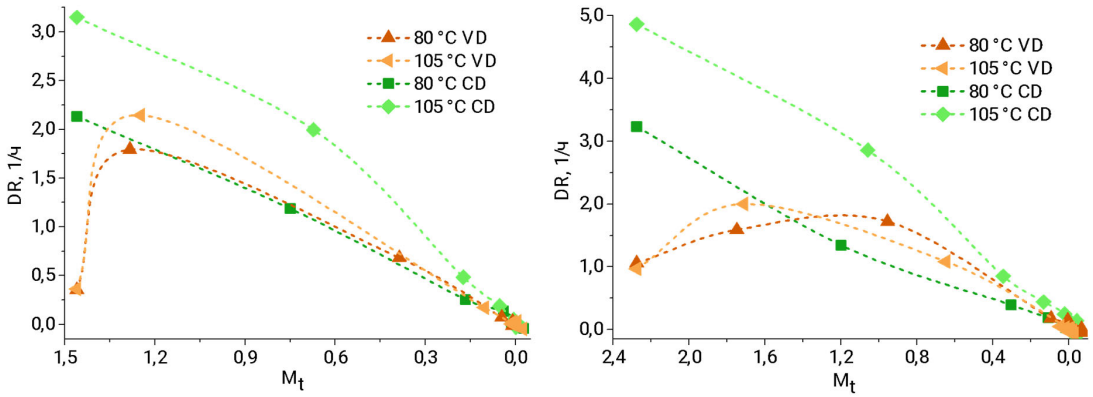


Рисунок 3. **Зависимость скорости сушки личинок *T. molitor* (а) и имаго *A. domesticus* (б) при различных условиях от влагосодержания (температура сушки 80 °C и 105 °C), VD — вакуумная сушка, CD — конвекционная сушка**

Figure 3. **Dependence of the drying rate of *T. molitor* larvae (a) and *A. domesticus* imago (б) on moisture content under different treatment conditions (drying temperature: 80 °C and 105 °C), VD — vacuum drying, CD — convection drying**

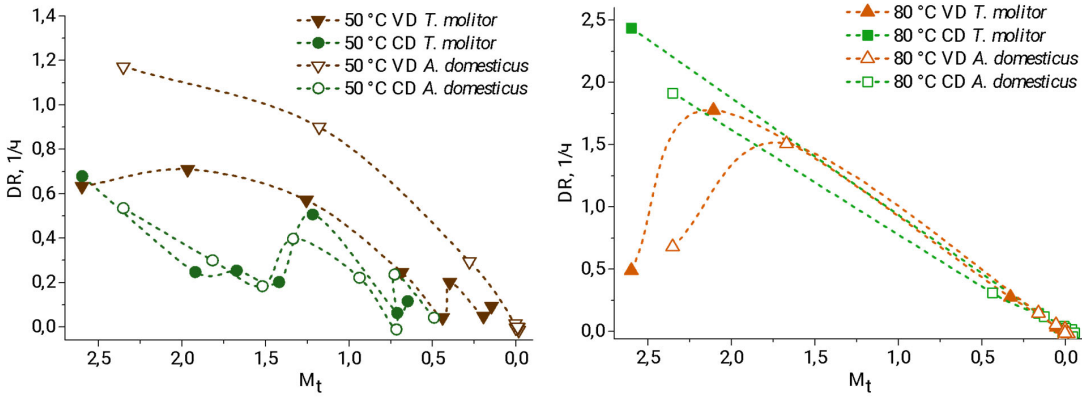


Рисунок 4. **Зависимость скорости сушки личинок *T. molitor* и имаго *A. domesticus* при различных условиях от влагосодержания (а – температура сушки 50 °C; б — температура сушки 80 °C), VD — вакуумная сушка, CD — конвекционная сушка**

Figure 4. **Dependence of the drying rate of *T. molitor* larvae (a) and *A. domesticus* imago (б) on moisture content under different treatment conditions (a – drying temperature: 50 °C; б — drying temperature: 80 °C), VD — vacuum drying, CD — convection drying**

коэффициент диффузии влаги в образце и замедляет ее перенос к поверхности и испарение [33,38]. Снижение скорости вакуумной сушки с уменьшением температуры наблюдалось для таких продуктов, как ломтики тыквы и редьки, мякоть манго и личи, грибы, травы, финики и другие [34].

Понижение давления в системе приводит к увеличению скорости сушки за счет увеличения скорости диффузии влаги в образце и испарения воды с поверхности [33]. В данном исследовании увеличение скорости сушки в вакууме по сравнению с конвекционной сушкой наблюдалось только для сверчка домашнего при температуре 50 °C (Рисунок 4). При высоких температурах на начальном этапе процесса скорость вакуумной сушки была ниже, чем при конвекционной, затем становилась сопоставимой или более высокой (Рисунок 3). Это связано с тем, что нагрев образцов в вакуумном шкафу происходил значительно медленнее. При высоких температурах сушки общее время достижения минимальной влажности было невелико и период нагрева материала оказывал существенное влияние на общее время сушки.

Кривые сушки большого мучного хрущака и сверчка домашнего при исследованных условиях практически не отличались (Рисунок 4). Различие в величинах DR при температурах 80 °C и 105 °C на втором этапе исследования (Рисунок 3) обусловлено тем, что исходная влажность личинок хрущака в этом случае была ниже влажности сверчка. Исключение составил образец сверчка домашнего, высушенный при температуре 50 °C в вакуумном шкафу. В этом случае скорость сушки сверчка была значительно выше скорости сушки хрущака и сопоставима с DR при 80 °C.

3.2. Внешний вид образцов

Внешний вид и цвет пищевого продукта оказывает значительное влияние на его восприятие потребителем [41]. Потемнение продукта в процессе приготовления, например, при жарке хлеба или мяса, может оцениваться потребителями положительно. Однако часто воспринимается негативно, например, в таких случаях, как при хранении овощей и фруктов, сушке и заморозке продуктов [42]. Кроме этого, изменение цвета является индикатором изменений в продукте, происходящих посредством протекания химических реакций [41]. В связи с этим важна оценка изменения внешнего вида продукции в результате обработки различными способами.

Температурная обработка и длительное хранение приводят к потемнению пищевых продуктов [41,42]. В зависимости от протекающих реакций потемнение продуктов делят на две основные группы: энзиматическое и неэнзиматическое [42]. Для того чтобы избежать потемнения за счет действия ферментов, их можно деактивировать до начала сушки кратковременной высокотемпературной обработкой [42]. Как показано в ряде исследований, бланширование насекомых в качестве предварительной обработки [26] или способа умерщвления [43] существенно снижает потемнение продукта в результате сушки. Реакции энзиматического потемнения продуктов питания протекают с участием кислорода, поэтому исключение его из системы также препятствует протеканию данного типа реакций [41,42].

К основным реакциям неэнзиматического потемнения относятся реакция Майяра [41,42,44], карамелизация [41,42,44], а также окисление липидов [41], аскорбиновой кислоты [42] и полифенолов [45]. Первые две реакции могут протекать в отсутствие кислорода, однако карамелизация характерна для продуктов с высоким содержанием сахаров, низким содержанием белка и протекает в основном при высоких температурах (выше 120 °C) [42,44,46]. Большой мучной хрущак и сверчок домашний характеризуются высоким содержанием белков и жиров [3,7,10,11], поэтому для них могут быть характерны как реакции окисления липидов, так и протекание реакции Майяра [35] — реакции между аминокислотными остатками и сахарами, приводящей к образованию меланоидинов [47]. Авторы [48] обнаружили продукты этих двух реакций в составе летучих соединений, выделяющихся при сушке личинок большого мучного хрущака.

Окисление полифенолов играет большую роль в процессах потемнения продуктов растительного происхождения [45,49], однако может происходить и в тканях насекомых. Например, в личинках черной львинки (*Hermetia illucens*), характеризующихся высоким содержанием железа, могут протекать реакции окисления и комплексообразования фенольных соединений с ионами Fe^{3+} [18,50]. Авторы [50] отмечают, что данный процесс характерен также и для большого мучного хрущака, однако в меньшей степени из-за меньшего содержания железа.

В данном исследовании все образцы насекомых были бланшированы при температуре 95–98 °C в течение 30 с непосредственно перед сушкой. Поэтому изменение цвета образцов в процессе дальнейшей обработки было вызвано преимущественно реакциями неферментативного потемнения.

Бланширование приводило к небольшому потемнению обоих видов насекомых относительно исходных замороженных (наблюдалось увеличение *BI*), однако в целом показатели цвета (L^*, a^*, b^*) менялись незначительно (Таблица 2). Для измельченных образцов наблюдалась другая закономерность. После измельчения замороженные личинки большого мучного хрущака быстро темнели при комнатной температуре, тогда как бланширование перед измельчением предотвращало этот процесс (Рисунок 5). Развитие темного цвета сразу после гомогенизации объясняется усилением энзиматического потемнения за счет высвобождения ферментов из разрушенных клеток образца [43]. Аналогичная зависимость, но менее выраженная, наблюдалась для сверчка домашнего (Рисунок 5). Авторы [51] отмечали, что как измельченная биомасса, так и экстракты из нее, были значительно светлее для бланшированных личинок черной львинки по сравнению с замороженными. В исследовании [52] нейтрализация эндогенной фенолоксидазы посредством бланширования в течение 50 с при температуре 90 °C позволяла снизить окрашивание белковых экстрактов, выделяемых из трех видов насекомых: *T. molitor*, *Alphitobius diaperinus* и *H. illucens*. Это свидетельствует о существенном вкладе энзиматического пути потемнения биомассы насекомых в процессе обработки. Следовательно, для сохранения цвета продукта требуется проводить инактивацию ферментов, участвующих в процессе, или осуществлять сушку в бескислородных условиях.

В данном исследовании степень изменения цвета (ΔE_{Lab}) образцов насекомых и муки в результате сушки при различных условиях рассчитывалась относительно бланшированного образца насекомых в исходном или измельченном виде. Стоит отметить, что помимо протекания химических процессов, сушка может изменять восприятие цвета из-за усадки продукта, а также разницы показателей преломления воды и воздуха: продукт, содержащий меньше воды, может отражать меньше света и иметь меньшее значение L^* [18].

Способ и температура сушки влияли на внешний вид личинок *T. molitor* (Рисунок 5). Высушивание в конвекционном шкафу приводило к деформации насекомых с уменьшением линейных размеров, тогда как вакуумная сушка позволяла сохранять изначальную форму личинок. Условия процесса оказывали значительное влияние и на цвет продукта (Таблица 2). Как обсуждалось выше, в условиях отсутствия кислорода (вакуумная сушка) потемнение личинок насекомых может быть вызвано преимущественно реакцией Майяра и взаимодействием фенольных соединений с минеральными веществами. С ростом температуры и времени сушки реакция Майяра усиливается [47]. Несмотря на это, значительных различий между показателями цвета (L^*, a^*, b^*) личинок, высушенных в вакуумном шкафу при различных температурах, не было обнаружено. Степень изменения цвета (ΔE_{Lab}) при вакуумной сушке была < 9, в 1,2–6,3 раза меньше, чем при использовании конвекционной сушки (ΔE_{Lab} от 11 до 36).

В случае конвекционной сушки личинок *T. molitor* с увеличением температуры от 50 °C до 80 °C образцы значительно темнели: значение L^* менялось от 43±5 до 19±5, *BI* — от 132 до 348. Значимых изменений показателей цвета между образцами, высушенными при температурах 80 °C и 105 °C, не наблюдалось. При сушке насекомых на воздухе (в конвекционном шкафу) реакция Майяра также протекает, однако значительно большее потемнение продукта в этом случае говорит о большем вкладе окислительных процессов в потемнение личинок *T. molitor*.

Конвекционная сушка сверчка домашнего приводила к деформации отдельных особей, однако визуально такие изменения были менее заметны, чем в случае большого мучного хрущака (Рисунок 5). Кроме того, конвекционная сушка, по сравнению с вакуумной, не вызывала большего потемнения продукта: все образцы имели схожие показатели ΔE_{Lab} и *BI* (Таблица 2). Аналогично изменение температуры процесса от 50 °C до 105 °C не оказывало значительного влияния на внешний вид и цвет *A. domesticus*, в отличие от *T. molitor*. *A. domesticus* имеет схожий жирнокислотный состав с личинками *T. molitor* [53,54], близкое содержание железа [50,55], в то время как содержание жира в сверчке

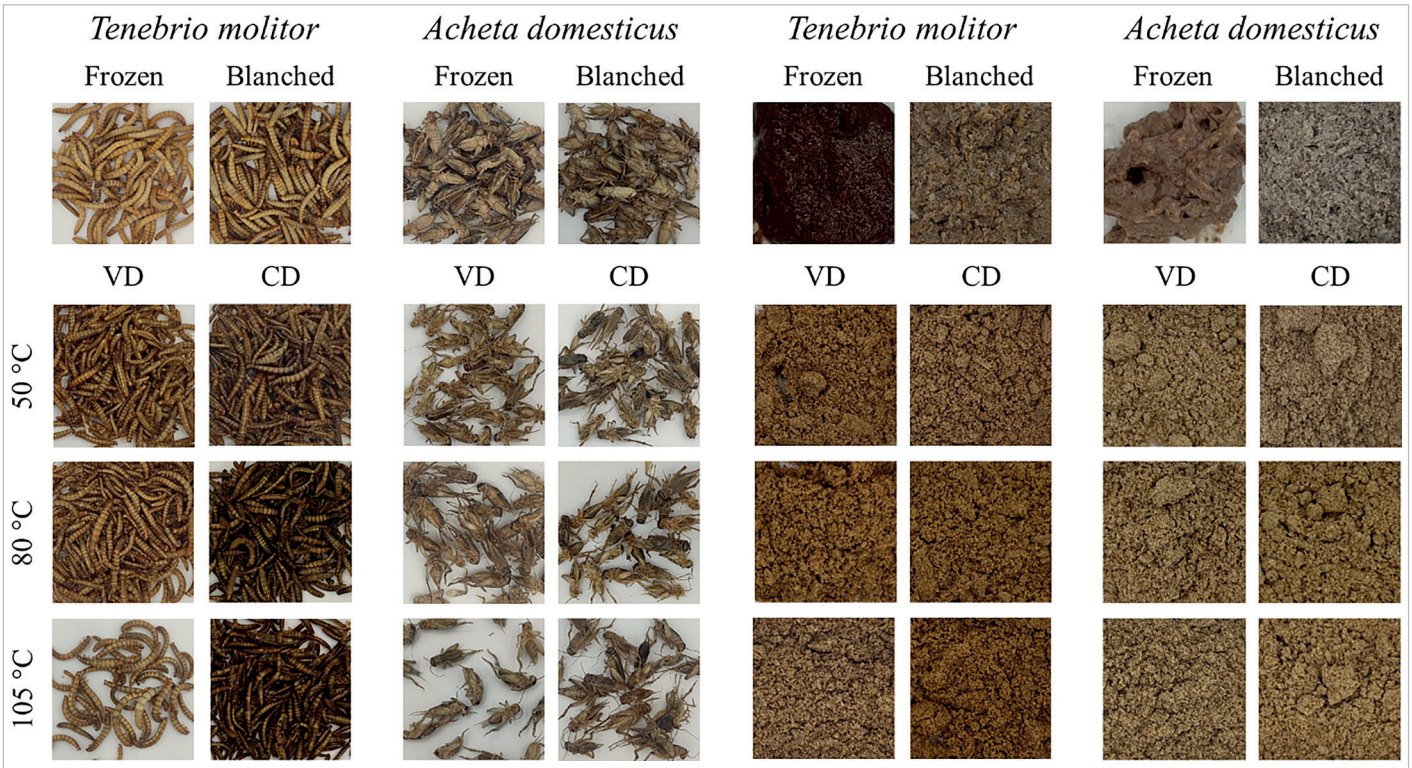


Рисунок 5. **Замороженные, бланшированные и высушенные при различных условиях личинки *T. molitor* и имаго *A. domesticus*; измельченные замороженные и бланшированные личинки *T. molitor* и имаго *A. domesticus*; мука из высушенных при различных условиях личинок *T. molitor* и имаго *A. domesticus* (Frozen — замороженные, Blanched — бланшированные, VD — вакуумная сушка, CD — конвекционная сушка)**

Figure 5. **Frozen, blanched and dried under different conditions *T. molitor* larvae and *A. domesticus* imago, as well as ground frozen and blanched *T. molitor* larvae and *A. domesticus* imago, and flour from *T. molitor* larvae and *A. domesticus* imago dried under different conditions (VD — vacuum drying, CD — convection drying)**

домашнем в среднем ниже, чем в личинках мучного хрущака [3]. Одновременно с этим, согласно [35], липиды *A. domesticus* в меньшей степени подвержены окислению благодаря высокой концентрации витамина Е, проявляющего антиоксидантную активность. Меньшее содержание жира и более высокая устойчивость к окислению снижает величину потемнения при обработке *A. domesticus* по сравнению с *T. molitor*, вызванного окислительными процессами.

Мука из личинок большого мучного хрущака, высушенных различными способами, имела схожий цвет по показателям L^*, a^*, b^* (Рисунок 5, Таблица 3). Величины L^* отличались незначительно для всех исследованных режимов сушки, а показатель *BI* уменьшался с увеличением температуры (и уменьшением времени) при сушке в вакууме и, наоборот, увеличивался при сушке в конвекционном шкафу. Это соотносится с данными, полученными для неизмельченных насекомых (Таблица 2), однако в целом различие цветов образцов муки было менее заметным, чем образцов насекомых.

Цветовые характеристики муки из сверчка домашнего практически не зависели от способа и температуры сушки — все образцы имели схожие показатели L^*, ΔE_{lab}, *BI* (Таблица 3). Величины изменения цвета относительно бланшированного образца (ΔE_{lab}) колебались в диапазоне 11,7–25,1 и были схожи со значениями, полученными для муки из личинок большого мучного хрущака — 13,4–21,8. В среднем мука из *A. domesticus* имела более светлый оттенок (L^* = 41–49, *H* = 1,16–1,23) и меньшую насыщенность цвета (*Ch* = 25,0–38,6), чем мука из личинок *T. molitor* (L^* = 37–45, *H* = 1,07–1,14, *Ch* = 33,6–44,1).

Таблица 2. **Цветовые характеристики замороженных, бланшированных и высушенных при различных условиях личинок *T. molitor* и имаго *A. domesticus***

Table 2. **Color characteristics of frozen, blanched and dried under different conditions *T. molitor* larvae and *A. domesticus* imago**

Образец		L^*	a^*	b^*	ΔE_{Lab}	*Ch*	*H*	*BI*
Личинки *Tenebrio molitor*								
Замороженные		55 ± 5^{a}	17 ± 2^{a}	37 ± 3^{ac}	—	40,3	1,13	123
Бланшированные		51 ± 5^{ab}	16 ± 2^{a}	37 ± 4^{ac}	—	40,2	1,17	136
Вакуум. сушка	50 °C	43 ± 5^{bd}	18 ± 1^{a}	38 ± 3^{a}	8,8	42,1	1,12	191
	80 °C	46 ± 5^{ad}	17 ± 1^{a}	35 ± 2^{ac}	5,7	38,8	1,11	149
	105 °C	50 ± 3^{ad}	12 ± 1^{bc}	32 ± 2^{ac}	6,5	33,9	1,21	111
Конвекц. сушка	50 °C	43 ± 5^{bd}	15 ± 1^{ac}	30 ± 2^{c}	10,7	33,4	1,11	132
	80 °C	19 ± 5^{c}	15 ± 2^{a}	22 ± 5^{b}	35,8	27,0	0,98	348
	105 °C	24 ± 7^{c}	15 ± 1^{a}	22 ± 4^{b}	31,2	27,1	0,97	224
Имаго *Acheta domesticus*								
Замороженные		44 ± 4^{a}	10 ± 1^{a}	21 ± 2^{ab}	—	23,3	1,11	80
Бланшированные		34 ± 7^{a}	11 ± 1^{a}	20 ± 2^{a}	—	22,5	1,08	107
Вакуум. сушка	50 °C	42 ± 5^{a}	11 ± 2^{a}	26 ± 2^{b}	10,1	28,2	1,18	110
	80 °C	41 ± 4^{a}	11 ± 2^{a}	21 ± 3^{ab}	7,0	24,0	1,07	91
	105 °C	39 ± 4^{a}	9 ± 1^{a}	22 ± 3^{ab}	6,0	23,7	1,17	95
Конвекц. сушка	50 °C	40 ± 5^{a}	9 ± 1^{a}	21 ± 2^{ab}	6,8	23,1	1,19	89
	80 °C	34 ± 5^{a}	11 ± 2^{a}	25 ± 4^{ab}	5,0	27,1	1,16	142
	105 °C	40 ± 5^{a}	10 ± 1^{a}	20 ± 3^{a}	6,0	21,8	1,11	83

Примечание: различные буквенные индексы (a, b, c, d) в одном столбце указывают на наличие значимой разницы между величинами ($p < 0,05$).

Таблица 3. **Цветовые характеристики измельченных замороженных и бланшированных личинок *T. molitor* и имаго *A. domesticus*, а также муки из высушенных при различных условиях личинок *T. molitor* и имаго *A. domesticus***

Table 3. **Color characteristics of ground frozen and blanched *T. molitor* larvae and A. domesticus imago as well as flour from T. molitor larvae and *A. domesticus* imago dried under different conditions**

Образец		L^*	a^*	b^*	ΔE_{Lab}	*Ch*	*H*	*BI*
Личинки *Tenebrio molitor* измельченные								
Замороженные		9 ± 3^{a}	15 ± 2^{a}	10 ± 2^{a}	–	18,0	0,58	332
Бланшированные		37 ± 4^{b}	10 ± 1^{b}	20 ± 2^{b}	–	22,5	1,09	94
Вакуум. сушка	50 °C	37 ± 4^{b}	18 ± 2^{ac}	37 ± 2^{c}	18,4	40,9	1,11	240
	80 °C	40 ± 4^{b}	20 ± 1^{c}	39 ± 2^{c}	21,8	44,1	1,10	229
	105 °C	45 ± 3^{b}	16 ± 1^{a}	30 ± 1^{d}	13,7	33,6	1,09	124
Конвекц. сушка	50 °C	43 ± 6^{b}	16 ± 1^{a}	30 ± 2^{d}	13,4	34,6	1,08	138
	80 °C	40 ± 4^{b}	18 ± 1^{ac}	38 ± 1^{c}	19,9	42,1	1,14	217
	105 °C	37 ± 4^{b}	20 ± 2^{c}	37 ± 3^{c}	19,1	41,6	1,07	241
Имаго *Acheta domesticus* измельченные								
Замороженные		39 ± 2^{a}	12 ± 1^{adce}	19 ± 1^{a}	–	22,2	1,03	87
Бланшированные		45 ± 4^{a}	6 ± 1^{b}	12 ± 1^{b}	–	13,7	1,12	41
Вакуум. сушка	50 °C	46 ± 2^{a}	11 ± 1^{ac}	32 ± 1^{cd}	20,3	33,8	1,23	124
	80 °C	41 ± 5^{a}	13 ± 1^{def}	31 ± 2^{c}	20,0	33,3	1,16	143
	105 °C	47 ± 8^{a}	12 ± 1^{adef}	30 ± 1^{c}	19,1	32,7	1,19	117
Конвекц. сушка	50 °C	42 ± 4^{a}	10 ± 1^{c}	23 ± 1^{e}	11,7	25,0	1,16	93
	80 °C	43 ± 5^{a}	13 ± 1^{ef}	36 ± 1^{f}	25,1	38,6	1,22	174
	105 °C	49 ± 5^{a}	14 ± 1^{f}	34 ± 1^{df}	23,8	37,2	1,18	132

Примечание: различные буквенные индексы (a, b, c, d, e, f) в одном столбце указывают на наличие значимой разницы между величинами ($p < 0,05$).

3.3. Микробиологические параметры

Проведено исследование зависимости микробиологической обсемененности измельченных насекомых и муки из *T. molitor* и *A. domesticus* от условий их обработки и сушки. Перечень исследуемых микробиологических показателей выбран на основе списка показателей безопасности, предусмотренных ТР ТС 021/2011[1], а также регламентом ЕС 2017/2470[2] (Таблица 4). В связи с тем, что в РФ на данный момент требования безопасности к пищевым продуктам из насекомых не установлены, в качестве ориентира рассматривались показатели для сушеных мясных продуктов, концентратов пищевых из мяса и субпродуктов (Таблица 4 — СМ). Дополнительно учитывались показатели для БАД на основе переработки мясомолочного сырья, включая субпродукты, птицу, членистоногих, земноводных и продукты пчеловодства в сухой форме, а также для БАД на основе мясного сырья, включая субпродукты птицы (Таблица 4 — БАД). В регламенте ЕС 2017/2470[2] представлена сводная таблица, в которой перечислены требования безопасности из всех регламентов, описывающих новые продукты питания. Насекомым как продуктам питания соответствуют регламенты (Таблица 4 — Insects): 2021/882[12] (высушенные личинки *T. molitor*), 2021/1975[13] (*Locusta migratoria* в замороженном и высушенном виде, в форме муки), 2022/169[14] (личинки *T. molitor* в замороженном и высушенном виде, в форме муки), 2022/188[15] (*A. domesticus* в замороженном и высушенном виде, в форме муки), 2023/5[16] (частично обезжиренная мука из *A. domesticus*), 2023/58[17] (*Alphitobius diaperinus* в замороженном и высушенном виде, в форме муки и пасты), 2025/89[18] (обработанная УФ мука из личинок *T. molitor*).

[12] Commission Implementing Regulation (EU) 2021/882 of 1 June 2021 authorising the placing on the market of dried Tenebrio molitor larva as a novel food under Regulation (EU) 2015/2283 of the European Parliament and of the Council, and amending Commission Implementing Regulation (EU) 2017/2470 Retrieved from https://eur-lex.europa.eu/eli/reg_impl/2021/882/oj/eng/pdf Accessed June 02, 2026

[13] Commission Implementing Regulation (EU) 2021/1975 of 12 November 2021 authorising the placing on the market of frozen, dried and powder forms of *Locusta migratoria* as a novel food under Regulation (EU) 2015/2283 of the European Parliament and of the Council and amending Commission Implementing Regulation (EU) 2017/2470 Retrieved from http://data.europa.eu/eli/reg_impl/2021/1975/oj/pdf Accessed June 02, 2026

[14] Commission Implementing Regulation (EU) 2022/169 of 8 February 2022 authorising the placing on the market of frozen, dried and powder forms of yellow mealworm (*Tenebrio molitor* larva) as a novel food under Regulation (EU) 2015/2283 of the European Parliament and of the Council, and amending Commission Implementing Regulation (EU) 2017/2470 Retrieved from https://eur-lex.europa.eu/eli/reg_impl/2022/169/oj/pdf Accessed June 02, 2026

[15] Commission Implementing Regulation (EU) 2022/188 of 10 February 2022 authorising the placing on the market of frozen, dried and powder forms of *Acheta domesticus* as a novel food under Regulation (EU) 2015/2283 of the European Parliament and of the Council, and amending Commission Implementing Regulation (EU) 2017/2470 Retrieved from https://eur-lex.europa.eu/eli/reg_impl/2022/188/oj/pdf Accessed June 02, 2026

[16] Commission Implementing Regulation (EU) 2023/5 of 3 January 2023 authorising the placing on the market of *Acheta domesticus* (house cricket) partially defatted powder as a novel food and amending Implementing Regulation (EU) 2017/2470 Retrieved from https://eur-lex.europa.eu/eli/reg_impl/2023/5/oj/pdf Accessed June 02, 2026

[17] Commission Implementing Regulation (EU) 2023/58 of 5 January 2023 authorising the placing on the market of the frozen, paste, dried and powder forms of *Alphitobius diaperinus* larvae (lesser mealworm) as a novel food and amending Implementing Regulation (EU) 2017/2470 Retrieved from https://eur-lex.europa.eu/eli/reg_impl/2023/58/oj/pdf Accessed June 02, 2026

[18] Commission Implementing Regulation (EU) 2025/89 of 20 January 2025 authorising the placing on the market of UV-treated powder of whole *Tenebrio molitor* larvae (yellow mealworm) as a novel food and amending Implementing Regulation (EU) 2017/2470 Retrieved from https://eur-lex.europa.eu/eli/reg_impl/2025/89/oj/pdf Accessed June 02, 2026

Таблица 4. **Микробиологические нормативы безопасности для продуктов питания**
Table 4. **Microbiological criteria of food safety**

ТР ТС 021/2011			Регламент ЕС 2017/2470	
Показатель	**СМ**	**БАД**	**Показатель**	**Insects**
Патогенные микроорганизмы, в том числе сальмонеллы, не допускаются в, г	25	10	*Salmonella* spp., не допускаются в, г	25
L. monocytogenes, не допускаются в, г	25	—	*L. monocytogenes*, не допускаются в, г	25
КМАФАнМ, КОЕ/г, не более	5×10^{3} †† 1×10^{4} **† $2{,}5\times0^{4}$ ***	1×10^{4}	Total aerobic colony count, КОЕ/г	$\leqslant 1\times10^{5}$
БГКП, не допускается в, г	1,0*** 0,1** 0,01†	0,1	—	—
E. coli, не допускается в, г	—	1,0	*E. coli*, КОЕ/г +	$\leqslant 5\times10^{1}$ ($\leqslant 1\times10^{1}$ Δ)
S. aureus, не допускается в, г	0,1† †† 0,01**	1,0	Coagulase-positive *staphylococci*, КОЕ/г	$\leqslant 1\times10^{2}$
Бактерии рода Proteus, не допускается в, г	1,0**† ††	—	—	—
Сульфитредуцирующие клостридии, не допускается в, г	—	—	Sulfite-reducing Anaerobes, КОЕ/г ++	$\leqslant 3\times10^{1}$ ($< 1\times10^{1}$ Δ)
—	—	—	*Clostridium perfringens*, КОЕ/г	$\leqslant 1\times10^{1}$ Δ
Плесени, КОЕ/г, не более	100***	—	Yeasts and moulds, КОЕ/г	$\leqslant 1\times10^{2}$
B. cereus, не допускаются в, г	—	—	*B. cereus*, КОЕ/г	$\leqslant 1\times10^{2}$
—	—	—	Enterobacteriaceae, КОЕ/г	$\leqslant 1\times10^{2}$ ($<1\times10^{1}$ ΔΔΔ $<1\times10^{2}$ ΔΔΔ)

Примечание:
** — для сушеных продуктов из мяса птицы;
*** — для концентратов пищевых из мяса и субпродуктов сухих;
† — для фарша цыплят сублимационной сушки;
†† — для фарша куриного тепловой сушки;
+ — β-глюкуронидаза-положительные *E. coli* для обработанной УФ муки из личинок *T. molitor* по регламенту 2025/89;
++ — не регламентируется для частично обезжиренной муки из *A. domesticus*;
Δ — для обработанной УФ муки из личинок *T. molitor* по регламенту 2025/89;
ΔΔ — для высушенных личинок *T. molitor* по регламенту 2021/882;
ΔΔΔ — для всех форм *A. domesticus*.

Согласно полученным данным (Таблица 5), замороженные насекомые имели высокие значения КМАФАнМ, содержали БГКП, кроме этого, биомасса сверчка домашнего содержала сульфитредуцирующие клостридии и значительные количества плесеней и дрожжей. Авторы [56] связывают высокое содержание микроорганизмов в насекомых с их кишечной микрофлорой, при этом, согласно данным [57], предварительное голодание не снижает количество микроорганизмов, поэтому применяются дополнительные способы обработки.

В данном исследовании первым этапом обработки биомассы насекомых было бланширование в дистиллированной воде при температуре 95–98 °C в течение 30 с. КМАФАнМ в бланшированных образцах по сравнению с необработанными было значительно ниже, отсутствовали БГКП. Для хрущака влияние бланшировки на плесени и дрожжи не обнаружено из-за изначально низкого количества КОЕ, в то время как обработка сверчка водой с температурой 95–98 °C привела к уменьшению содержания этих микроорганизмов. Аналогичные данные описываются авторами [58]. В исследовании проводилась обработка личинок большого мучного хрущака и домашнего сверчка кипящей водой. Авторы установили, что бланширование в течение 1–4 минут приводило к значительному снижению общего числа микроорганизмов, дрожжей и плесеней. Однако в бланшированных образцах обнаружены сульфитредуцирующие клостридии в 1,0 г насекомых, которые могут быть устойчивыми к нагреванию [59,60].

На следующем этапе работы исследовались микробиологические показатели биомассы насекомых после вакуумной и конвекционной сушки при различных температурах. Все исследованные режимы сушки позволили получить образцы, общее количество микроорганизмов в которых удовлетворяло бы требованиям регламента ЕС для пищевой продукции из насекомых ($\leqslant 1\times10^{5}$). Однако для нескольких

Таблица 5. **Микробиологические показатели измельченных замороженных и бланшированных личинок *T. molitor* и имаго *A. domesticus*, а также муки из высушенных при различных условиях личинок *T. molitor* и имаго *A. domesticus***
Table 5. **Microbiological criteria of ground frozen and blanched *T. molitor* larvae and *A. domesticus* imago as well as flour from *T. molitor* larvae and *A. domesticus* imago dried under different conditions**

Образец		**КМАФАнМ, КОЕ/г**	**БГКП, в г**			**Сульфитредуцирующие клостридии, в г**			**Плесени, КОЕ/г**	**Дрожжи, КОЕ/г**
			1,0	**0,1**	**0,01**	**1,0**	**0,1**	**0,01**		
Личинки *Tenebrio molitor*										
Замороженный		$>3{,}0\times10^{5}$	+	+	–	–	–	–	$<5{,}0\times10^{1}$	$<1{,}0\times10^{1}$
Бланшированный		$<1{,}5\times10^{3}$	–	–	–	+	–	–	$<5{,}0\times10^{1}$	$<1{,}0\times10^{1}$
Вакуум. сушка	50 °C	$<1{,}5\times10^{3}$	–	–	–	–	–	–	$9{,}0\times10^{1}$	$<1{,}0\times10^{1}$
	80 °C	$3{,}0\times10^{2}$	+	–	–	–	–	–	$<5{,}0\times10^{1}$	$<1{,}0\times10^{1}$
	105 °C	$7{,}1\times10^{3}$	–	–	–	–	–	–	$1{,}0\times10^{1}$	$<1{,}0\times10^{1}$
Конвекц. сушка	50 °C	$5{,}0\times10^{4}$	–	+	–	–	–	–	$1{,}6\times10^{2}$	$<1{,}0\times10^{1}$
	80 °C	$<1{,}5\times10^{3}$	–	–	–	–	–	–	$8{,}0\times10^{1}$	$<1{,}0\times10^{1}$
	105 °C	$<1{,}5\times10^{3}$	–	–	–	–	–	–	$<5{,}0\times10^{1}$	$<1{,}0\times10^{1}$
Имаго *Acheta domesticus*										
Замороженный		$>3{,}0\times10^{5}$	+	+	+	+	+	+	$<5{,}0\times10^{2}$	$1{,}7\times10^{3}$
Бланшированный		$<1{,}5\times10^{3}$	–	–	–	+	–	–	$<1{,}0\times10^{1}$	$<1{,}0\times10^{1}$
Вакуум. сушка	50 °C	$<1{,}5\times10^{3}$	–	+	–	+	–	–	$1{,}1\times10^{2}$	$<1{,}0\times10^{1}$
	80 °C	$4{,}1\times10^{4}$	+	–	–	+	+	–	$1{,}0\times10^{1}$	$<1{,}0\times10^{1}$
	105 °C	$8{,}0\times10^{2}$	–	–	–	–	–	–	$2{,}0\times10^{1}$	$<1{,}0\times10^{1}$
Конвекц. сушка	50 °C	$<1{,}5\times10^{3}$	–	–	–	–	–	–	$2{,}2\times10^{2}$	$<1{,}0\times10^{1}$
	80 °C	$<1{,}5\times10^{3}$	–	–	–	–	–	–	$<5{,}0\times10^{1}$	$<1{,}0\times10^{1}$
	105 °C	$<1{,}5\times10^{3}$	–	–	–	–	–	–	$<1{,}0\times10^{1}$	$<1{,}0\times10^{1}$

Примечание: (+) — микроорганизмы обнаружены, (–) — микроорганизмы не обнаружены.

образцов обнаружено превышение показателей КМАФАнМ, плесени и БГКП относительно требований, установленных в ТР ТС 021/2011[1] (Таблица 4 и Таблица 5). Такие образцы получены для большого мучного хрущака и сверчка домашнего, высушенных в вакуумном или конвекционном шкафу при температуре 50 °C или 80 °C. При этом, образцы муки из насекомых, полученные после высушивания при 105 °C, удовлетворяли всем требованиям микробиологической безопасности, указанным в обоих нормативных документах.

Наличие сульфитредуцирующих клостридий в образцах сверчка после вакуумной сушки при температурах 50 °C и 80 °C может быть связано с недостаточной эффективностью такой обработки против термоустойчивых бактерий. Также обнаружение этих микроорганизмов в исследованных образцах сверчка и хрущака (Таблица 5) может быть связано с термической активацией спор основного вида сульфитредуцирующих клостридий *Clostridium perfringens*, для которого, по данным [59], характерно прорастание 97 % спор при кратковременной обработке при температуре 80 °C. Кроме того, воздействие в течение 48 ч температурой 75 °C, согласно данным [60], не приводило к полному уничтожению спор *C. perfringens*, и их уровень находился в пределах 10^{2}–10^{3} КОЕ/г [60]. В образцах, высушенных при температуре 105 °C, сульфитредуцирующие клостридии не обнаружены.

Ни в одном из исследованных образцов, включая замороженные, не были обнаружены *L. monocytogenes* (в 25 г), *Salmonella* spp. (в 25 г), коагулазоположительные стафилококки (в 1,0, 0,1 и 0,01 г), *B. cereus* (в 0,1, 0,01 г), *E. coli* (в 1,0, 0,1 и 0,01 г).

Таким образом, бланшированные и высушенные при температуре 105 °C при помощи вакуумной и конвекционной сушки насекомые и мука из них соответствовали требованиям микробиологической безопасности, установленным в ТР ТС 021/2011[1] и регламенте ЕС 2017/2470[2] для данного вида продуктов питания.

4. Выводы

В исследовании проведено сравнение конвекционной и вакуумной сушки личинок большого мучного хрущака (*T. molitor*) и имаго сверчка домашнего (*A. domesticus*) при температурах 50 °C, 80 °C и 105 °C. Оценено влияние способа и условий сушки на скорость процесса, внешний вид получаемого продукта и его микробиологическую безопасность. Установлено, что повышение температуры

сушки позволяло сократить продолжительность процесса для обоих видов насекомых. Однако при конвекционной сушке личинок *T. molitor* это также приводило к значительному потемнению продукта. При сушке сверчка домашнего температура процесса не оказывала влияния на цвет получаемой муки. Вакуумная сушка позволяла сохранить цвет и внешний вид обоих насекомых. Что касается микробиологической безопасности, то сушка при температуре 105 °C (вне зависимости от способа) обеспечивала получение продукта, соответствующего нормативным требованиям без дополнительной обработки. Режимы 50 °C и 80 °C были недостаточны для гарантированной инактивации микроорганизмов, и полученные при этих температурах продукты требовали обязательной постобработки. Однако для сохранения характеристик целевого продукта в неизменном виде, в частности для минимизации окисления липидов и денатурации белков, целесообразно применение вакуумной сушки при 50 °C. В этих условиях продолжительность процесса увеличивалась: для обработки личинок *T. molitor* требовалось значительно больше времени по сравнению с *A. domesticus*.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / REFERENCES

1. Newbold, T., Hudson, L. N., Hill, S. L. L., Contu, S., Lysenko, I., Senior, R. A. et al. (2015). Global effects of land use on local terrestrial biodiversity. *Nature*, 520(7545), 45–50. https://doi.org/10.1038/nature14324
2. Gallardo, R. K. (2024). The environmental impacts of agriculture: A review. *International Review of Environmental and Resource Economics*, 18(1–2), 165–235. https://doi.org/10.1561/101.00000166
3. Amoah, I., Cobbinah, J. C., Yeboah, J. A., Essiam, F. A., Lim, J. J., Tandoh, M. A. et al. (2023). Edible insect powder for enrichment of bakery products — A review of nutritional, physical characteristics and acceptability of bakery products to consumers. *Future Foods*, 8, Article 100251. https://doi.org/10.1016/j.fufo.2023.100251
4. Yazici, G. N., Ozer, M. S. (2021). Using edible insects in the production of cookies, biscuits, and crackers: A review. *Biology and Life Sciences Forum*, 6(1), Article 80. https://doi.org/10.3390/Foods2021-10974
5. van Huis, A., Oonincx, D. G. A. B. (2017). The environmental sustainability of insects as food and feed. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 37(5), Article 43. https://doi.org/10.1007/s13593-017-0452-8
6. Gahukar, R. T. (2016). Edible insects farming: Efficiency and impact on family livelihood, food security, and environment compared with livestock and crops. Chapter in a book: Insects as Sustainable Food Ingredients. Academic Press, 2016. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802856-8.00004-1
7. Hammer, L., Moretti, D., Abbühl-Eng, L., Kandiah, P., Hilaj, N., Portmann, R. et al. (2023). Mealworm larvae (*Tenebrio molitor*) and crickets (*Acheta domesticus*) show high total protein in vitro digestibility and can provide good-to-excellent protein quality as determined by in vitro DIAAS. *Frontiers in Nutrition*, 10, Article 1150581. https://doi.org/10.3389/fnut.2023.1150581
8. Rodríguez-Rodríguez, M., Barroso, F. G., Fabrikov, D., Sánchez-Muros, M. J. (2022). In vitro crude protein digestibility of insects: A review. *Insects*, 13(8), Article 682. https://doi.org/10.3390/insects13080682
9. Churchward-Venne, T. A, Pinckaers, P. J. M., Van Loon, J. J. A., Van Loon, L. J. C. (2017). Consideration of insects as a source of dietary protein for human consumption. *Nutrition Reviews*, 75(12), 1035–1045. https://doi.org/10.1093/nutrit/nux057
10. Syahrulawal, L., Torske, M. O., Sapkota, R., Næss, G., Khanal, P. (2023). Improving the nutritional values of yellow mealworm *Tenebrio molitor* (Coleoptera: Tenebrionidae) larvae as an animal feed ingredient: A review. *Journal of Animal Science and Biotechnology*, 14(1), Article 146. https://doi.org/10.1186/s40104-023-00945-x
11. Nafary, A., Mousavi Nezhad, S. A., Jalili, S. (2023). Extraction and characterization of chitin and chitosan from *Tenebrio molitor* beetles and investigation of its antibacterial effect against *Pseudomonas aeruginosa*. *Advanced Biomedical Research*, 12(1), Article 96. https://doi.org/10.4103/abr.abr_205_22
12. Turck, D., Castenmiller, J., De Henauw, S., Hirsch-Ernst, K. I., Kearney, J., Maciuk, A., et al. (2021). Safety of dried yellow mealworm (*Tenebrio molitor* larva) as a novel food pursuant to Regulation (EU) 2015/2283. *EFSA Journal*, 19(1), Article e06343. https://doi.org/10.2903/j.efsa.2021.6343
13. Mlcek, J., Rop, O., Borkovcova, M., Bednarova, M. (2014). A comprehensive look at the possibilities of edible insects as food in Europe — A review. *Polish Journal of Food and Nutrition Sciences*, 64(3), 147–157. https://doi.org/10.2478/v10222-012-0099-8
14. EFSA Panel on Nutrition, Novel Foods and Food Allergens (NDA), Turck, D., Bohn, T., Cámara, M., Castenmiller, J., De Henauw, S. et al. (2024). Safety of frozen, dried and powder forms of house crickets (*Acheta domesticus*) as a novel food pursuant. *EFSA Journal*, 22(12). Article e9101. https://doi.org/10.2903/j.efsa.2024.9101
15. Ardoin, R., Prinyawiwatkul, W. (2021). Consumer perceptions of insect consumption: A review of western research since 2015. *International Journal of Food Science and Technology*, 56(10), 4942–4958. https://doi.org/10.1111/ijfs.15167
16. Delicato, C., Schouteten, J. J., Dewettinck, K., Gellynck, X., Tzompa-Sosa, D. A. (2020). Consumers' perception of bakery products with insect fat as partial butter replacement. *Food Quality and Preference*, 79, Article 103755. https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2019.103755
17. Polubesova, M. A., Novikova (Zakharova), M. V., Ryabukhin, D. S. (2022). Entomophagy: Are insects safe for human food? *Food systems*, 5(1), 70–76. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2022-5-1-70-76
18. Larouche, J., Deschamps, M.-H., Saucier, L., Lebeuf, Y., Doyen, A., Vandenberg, G.W. (2019). Effects of killing methods on lipid oxidation, colour and microbial load of black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae. *Animals*, 9(4), Article 182. https://doi.org/10.3390/ani9040182
19. Dossey, A. T., Tatum, J. T., McGill, W. L. (2016). Modern insect-based food industry: Current status, insect processing technology, and recommendations moving forward. Chapter in a book: Insects as Sustainable Food Ingredients. Academic Press, 2016. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802856-8.00005-3
20. Wessels, M. L. J., Azzollini, D., Fogliano, V. (2020). Frozen storage of lesser mealworm larvae (*Alphitobius diaperinus*) changes chemical properties and functionalities of the derived ingredients. *Food Chemistry*, 320, Article 126649. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.126649
21. Garofalo, C., Milanović, V., Cardinali, F., Aquilanti, L., Clementi, F., Osimani, A. (2019). Current knowledge on the microbiota of edible insects intended for human consumption: A state-of-the-art review. *Food Research International*, 125, Article 108527. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2019.108527
22. Moosekian, S. R., Jeong, S., Marks, B. P., Ryser, E. T. (2012). X-ray irradiation as a microbial intervention strategy for food. *Annual Review of Food Science and Technology*, 3, 493–510. https://doi.org/10.1146/annurev-food-022811-101306
23. Bogusz, R., Bryś, J., Onopiuk, A., Pobiega, K., Tomczak, A., Kowalczewski, P.Ł. et al. (2024). The impact of drying methods on the quality of blanched yellow mealworm (*Tenebrio molitor* L.) larvae. *Molecules*, 29(15), Article 3679. https://doi.org/10.3390/molecules29153679
24. Vlahova-Vangelova, D., Balev, D., Kolev, N., Dragoev, S., Petkov, E., Popova, T. (2024). Comparison of the effect of drying treatments on the physicochemical parameters, oxidative stability, and microbiological status of yellow mealworm (*Tenebrio molitor* L.) flours as an alternative protein source. *Agriculture*, 14(3), Article 436. https://doi.org/10.3390/agriculture14030436
25. Trukhanova, K. A., Mechtaeva, E. V., Novikova, M. V., Sorokoumov, P. N., Ryabukhin, D. S. (2022). Influence of drying and pretreatment methods on certain parameters of yellow mealworm larvae (*Tenebrio molitor*). *Theory and Practice of Meat Processing*, 7(4), 247–257. https://doi.org/10.21323/2414-438X-2022-7-4-247-257
26. Azzolini, D., Derossi, A., Severini, C. (2016). Understanding the drying kinetic and hygroscopic behaviour of larvae of yellow mealworm (*Tenebrio molitor*) and the effects on their quality. *Journal of Insects as Food and Feed*, 2(4), 233–244. https://doi.org/10.3920/JIFF2016.0001
27. Inyang, U. E., Oboh, I. O., Etuk, B. R. (2018). Kinetic models for drying techniques — food materials. *Advances in Chemical Engineering and Science*, 8(2), 27–48. https://doi.org/10.4236/aces.2018.82003
28. Xu, P., Zhang, Z., Peng, X., Yang, J., Li, X., Yuan, T. et al. (2022). Study on vacuum drying kinetics and processing of the *Lonicera japonica* Thunb. aqueous extracts. *LWT*, 167, Article 113868. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.113868
29. Lashkari, H., Halabinejad, M., Rafati, A., Namdar, A. (2020). Shelf life extension of veal meat by edible coating incorporated with *Zataria multiflora* essential oil. *Journal of Food Quality*, 2020, Article 8871857. https://doi.org/10.1155/2020/8871857
30. Purschke, B., Brüggen, H., Scheibelberger, R., Jäger, H. (2018). Effect of pre-treatment and drying method on physico-chemical properties and dry fractionation behaviour of mealworm larvae (*Tenebrio molitor* L.). *European Food Research and Technology*, 244(2), 269–280. https://doi.org/10.1007/s00217-017-2953-8
31. Maskan, M. (2001). Kinetics of colour change of kiwifruits during hot air and microwave drying. *Journal of Food Engineering*, 48(2), 169–175. https://doi.org/10.1016/S0260-8774(00)00154-0
32. Kröncke, N., Böschen, V., Woyzichovski, J., Demtröder, S., Benning, R. (2018). Comparison of suitable drying processes for mealworms (*Tenebrio molitor*). *Innovative Food Science and Emerging Technologies,* 50, 20–25. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2018.10.009
33. Beigi, M. (2017). Mathematical modelling and determination of mass transfer characteristics of celeriac slices under vacuum drying. *Periodica Polytechnica Chemical Engineering*, 61(2), 109–116. https://doi.org/10.3311/PPch.9271
34. Richter Reis, F., Ivahashi, M. M., Guéniat Rosa, A. H. (2016). Effect of vacuum drying temperature on drying kinetics, effective moisture diffusivity and quality of peeled litchi (*Litchi chinensis* Sonn.). *Journal of Food Process Engineering*, 40(2), Article e12419. https://doi.org/10.1111/jfpe.12419
35. Khatun, H., Claes, J., Smets, R., De Winne, A., Akhtaruzzaman, M., Van Der Borght, M. (2021). Characterization of freeze-dried, oven-dried and blanched house crickets (*Acheta domesticus*) and Jamaican field crickets (*Gryllus assimilis*) by means of their physicochemical properties and volatile compounds. *European Food Research and Technology*, 247(5), 1291–1305. https://doi.org/10.1007/s00217-021-03709-x
36. Fröhling, A., Bußler, S., Durek, J., Schlüter, O.K. (2020). Thermal impact on the culturable microbial diversity along the processing chain of flour from crickets (*Acheta domesticus*). *Frontiers in Microbiology*, 11, Article 884. https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.00884
37. Psarianos, M., Rossi Ribeiro, L., Landgraber, E., Ojha, S., Schlüter, O.K. (2025). Combined effect of pulsed electric fields and drying method on the microbial load and protein properties of house crickets (*Acheta domesticus*). *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 102, Article 104027. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2025.104027
38. Hosseinpour, S., Rafiee, S., Mohtasebi, S.S., Aghbashlo, M. (2013). Application of computer vision technique for on-line monitoring of shrimp color changes during drying. *Journal of Food Engineering*, 115(1), 99–114. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2012.10.003
39. Sharma, G. P., Prasad, S. (2001). Drying of garlic (*Allium sativum*) cloves by microwave-hot air combination. *Journal of Food Engineering*, 50(2), 99–105. https://doi.org/10.1016/S0260-8774(00)00200-4
40. Martins, M. G., Martins, D. E. G., Pena, R. da S. (2015). Drying kinetics and hygroscopic behavior of pirarucu (*Arapaima gigas*) fillet with different salt contents. *LWT — Food Science and Technology*, 62(1), 144–151. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.01.010

41. Hidalgo, F. J., Zamora, R. (2000). The role of lipids in nonenzymatic browning. *Grasas y Aceites*, 51(1–2), 35–49. https://doi.org/10.3989/gya.2000.v51.i1-2.405
42. Das, D., Bhattacharya, A., Ikbal, A., Chowdhury, S., Murmu, P., Nath, S. et al. (2022). A mini-review: Enzymatic and non-enzymatic browning. *International Research Journal of Innovations in Engineering and Technology*, 6(8), 118–123. https://doi.org/10.47001/IRJIET/2022.608014
43. Zhen, Y., Chundang, P., Zhang, Y., Wang, M., Vongsangnak, W., Pruksakorn, C. et al. (2020). Impacts of killing process on the nutrient content, product stability and *in vitro* digestibility of black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae meals. *Applied Sciences*, 10(17), Article 6099. https://doi.org/10.3390/app10176099
44. Gupta, S., Sood, M., Gupta, N., Bandral, J. D., Langeh, A. (2022). Food browning, its type and controlling measures: A review article. *Chemical Science Review and Letters*, 11(44), 417–424. https://doi.org/10.37273/chesci.cs205307512
45. Yu, Y., Chen, D., Li, W., Mou, Y., Geng, Y., Chen, F. et al. (2023). Quinone reactivity: Investigation of their contribution to nonenzymatic browning. *Food Frontiers*, 4(2), 945–954. https://doi.org/10.1002/fft2.247
46. Corzo-Martınez, M., Corzo, N., Villamiel, M., del Castillo, M.D. (2012). Browning Reactions. Chapter in a book: Food Biochemistry and Food Processing (2nd ed.). John Wiley and Sons, Inc. 2012. https://doi.org/10.12691/ajfst-7-5-1
47. El Hosry, L., Elias, V., Chamoun, V., Halawi, M., Cayot, P., Nehme, A. et al. (2025). Maillard reaction: Mechanism, influencing parameters, advantages, disadvantages, and food industrial applications: A review. *Foods*, 14(11), Article 1881. https://doi.org/10.3390/foods14111881
48. Kröncke, N., Grebenteuch, S., Keil, C., Demtröder, S., Kroh, L., Thünemann, A. F. et al. (2019). Effect of different drying methods on nutrient quality of the yellow mealworm (*Tenebrio molitor* L.). *Insects*, 10(4), Article 84. https://doi.org/10.3390/insects10040084
49. Xu, Z., Yang, Z., Ji, J., Mou, Y., Chen, F., Xiao, Z. et al. (2023). Polyphenol mediated non-enzymatic browning and its inhibition in apple juice. *Food Chemistry*, 404(A), Article 134504. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.134504
50. Janssen, R. H., Canelli, G., Sanders, M.G., Bakx, E. J., Lakemond, C. M. M., Fogliano, V. et al. (2019). Iron-polyphenol complexes cause blackening upon grinding *Hermetia illucens* (black soldier fly) larvae. *Scientific Reports*, 9(1), Article 2967. https://doi.org/10.1038/s41598-019-38923-x
51. Leni, G., Caligiani, A., Sforza, S. (2019). Killing method affects the browning and the quality of the protein fraction of Black Soldier Fly (*Hermetia illucens*) prepupae: A metabolomics and proteomic insight. *Food Research International,* 115, 116–125. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.08.021
52. Janssen, R. H., Vincken, J.-P., Arts, N. J. G., Fogliano, V., Lakemond, C. M. M. (2019). Effect of endogenous phenoloxidase on protein solubility and digestibility after processing of *Tenebrio molitor*, *Alphitobius diaperinus* and *Hermetia illucens*. *Food Research International*, 121, 684–690. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.12.038
53. Tzompa-Sosa, D. A., Dewettinck, K., Provijn, P., Brouwers, J. F., de Meulenaer, B., Oonincx, D.G.A.B. (2021). Lipidome of cricket species used as food. *Food Chemistry*, 349, Article 129077. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129077
54. Siow, H. S., Sudesh, K., Murugan, P., Ganesan, S. (2021). Mealworm (*Tenebrio molitor*) oil characterization and optimization of the free fatty acid pretreatment via acid-catalyzed esterification. *Fuel*, 299, Article 120905. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.120905
55. Kosečková, P., Zvěřina, O., Pěchová, M., Krulíkova, M., Duborská, E., Borkovcová, M. (2022). Mineral profile of cricket powders, some edible insect species and their implication for gastronomy. *Journal of Food Composition and Analysis*, 107, Article 104340. https://doi.org/10.1016/j.jfca.2021.104340
56. Klunder, H. C., Wolkers-Rooijackers, J., Korpela, J. M., Nout, M. J. R. (2012). Microbiological aspects of processing and storage of edible insects. *Food Control*, 26(2), 628–631. https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2012.02.013
57. Wynants, E., Crauwels, S., Lievens, B., Luca, S., Claes, J., Borremans, A. et al. (2017). Effect of post-harvest starvation and rinsing on the microbial numbers and the bacterial community composition of mealworm larvae (*Tenebrio molitor*). *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 42, 8–15. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2017.06.004
58. Caparros Megido, R., Desmedt, S., Blecker, C., Béra, F., Haubruge, É., Alabi, T. et al. (2017). Microbiological load of edible insects found in Belgium. *Insects*, 8(1), Article 12. https://doi.org/10.3390/insects8010012
59. Xiao, Q., Luo, H., Pan, Q., Chen, C., Xu, B., Li, P. (2025). Dual roles of heat treatments on the *Clostridium perfringens* spores: Germination or inactivation? *Food Bioscience*, 68, Article 106723. https://doi.org/10.1016/j.fbio.2025.106723
60. Márquez-González, M., Cabrera-Díaz, E., Hardin, M. D., Harris, K. B., Lucia, L. M., Castillo, A. (2012). Survival and germination of *Clostridium perfringens* spores during heating and cooling of ground pork. *Journal of Food Protection*, 75(4), 682–689. https://doi.org/10.4315/0362-028X.JFP-11-409

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ	AUTHOR INFORMATION
Принадлежность к организации	**Affiliation**
Мечтаева Елизавета Владимировна — научный сотрудник, лаборатория промышленных биотехнологических инноваций, Всероссийский научно-исследовательский институт пищевых добавок 190000, Санкт-Петербург, Литейный пр., 55 E-mail: e.mechtaeva@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7879-7994 * автор для контактов	**Elizaveta V. Mechtaeva**, Researcher, Laboratory of Industrial Bio-technological Innovations, All-Russian Research Institute for Food Additives 55, Liteiny pr., 190000, St. Petersburg, Russia E-mail: e.mechtaeva@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7879-7994 * corresponding author
Васильев Платон Николаевич — лаборант-исследователь, лаборатория промышленных биотехнологических инноваций, Всероссийский научно-исследовательский институт пищевых добавок 190000, Санкт-Петербург, Литейный пр., 55 E-mail: vasiljevpl4ton@yandex.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9954-4689	**Platon N. Vasilev**, Laboratory Assistant, Laboratory of Industrial Bio-technological Innovations, All-Russian Research Institute for Food Additives 55, Liteiny pr., 190000, St. Petersburg, Russia E-mail: vasiljevpl4ton@yandex.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9954-4689
Никитина Наталия Александровна — лаборант-исследователь, лаборатория промышленных биотехнологических инноваций, Всероссийский научно-исследовательский институт пищевых добавок 190000, Санкт-Петербург, Литейный пр., 55 E-mail: nikitinanatalia2003@yandex.ru ORCID: https://orcid.org/0009-0002-0064-3340	**Natalia A. Nikitina**, Laboratory Assistant, Laboratory of Industrial Bio-technological Innovations, All-Russian Research Institute for Food Additives 55, Liteiny pr., 190000, St. Petersburg, Russia E-mail: nikitinanatalia2003@yandex.ru ORCID: https://orcid.org/0009-0002-0064-3340
Журавлева Айгуль Зарифовна — кандидат ветеринарных наук, заместитель директора по качеству, Всероссийский научно-исследовательский институт пищевых добавок 190000, Санкт-Петербург, Литейный пр., 55 E-mail: a.zhuravleva@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0009-0003-2683-269X	**Aigul Z. Zhuravleva**, Candidate of Veterinary Sciences, Deputy Director, All-Russian Research Institute for Food Additives 55, Liteiny pr., 190000, St. Petersburg, Russia E-mail: a.zhuravleva@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0009-0003-2683-269X
Ситнов Вениамин Юрьевич — директор, Всероссийский научно-исследовательский институт пищевых добавок 190000, Санкт-Петербург, Литейный пр., 55 E-mail: v.sitnov@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1927-1997	**Veniamin Yu. Sitnov**, Director, All-Russian Research Institute for Food Additives 55, Liteiny pr., 190000, St. Petersburg, Russia E-mail: v.sitnov@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1927-1997
Критерии авторства	**Contribution**
Мечтаева Е. В. — планирование и проведение исследований, обработка результатов, написание и редактирование статьи; **Васильев П. Н.** — проведение исследований, обработка результатов, написание статьи; **Никитина Н. А.** — обработка результатов, написание статьи; **Журавлева А. З.** — обеспечение исследований, обработка результатов; **Ситнов В. Ю.** — привлечение финансирования, администрирование проекта.	**Mechtaeva E. V.** — investigation, data curation, writing — original draft, writing, review and editing; **Vasilev P. N.** — investigation, data curation, writing — original draft; **Nikitina N. A.** — data curation, writing — original draft; **Zhuravleva A. Z.** — resources, data curation; **Sitnov V. Yu.** — funding acquisition, project administration.
Конфликт интересов	**Conflict of interest**
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.	The authors declare no conflict of interest.