Volume 8, Issue 3, 2025

# 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 27.09.2025.
Дата выхода в свет 30.09.2025.
Тираж 300 экз. Заказ № 100.

16+

© ФНЦПС, 2025
© Авторы, 2025

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 27.09.2025.
Released from press 30.09.2025.
Circulation — 300 copies. Order № 100.

16+

© FNCPS, 2025
© Authors, 2025

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

Петрунина И. В., Горбунова Н. А., Кузлякина Ю. А., Замула В. С.
РОЛЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ИННОВАЦИЙ В ОБЕСПЕЧЕНИИ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ ..... 316

Фомина Т. А., Хвостов Д. В., Минаев М. Ю., Утьянов Д. А.
РАЗРАБОТКА МУЛЬТИПЛЕКСНОЙ ПЦР ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВИДОСПЕЦИФИЧНОЙ ДНК САЙРЫ (*COLOLABIS SAIRA*) И ДАЛЬНЕВОСТОЧНОЙ САРДИНЫ, ИВАСИ (*SARDINOPS MELANOSTICTUS*) ..... 324

Зинина О. В., Вишнякова Е. А., Науменко Н. В., Ребезов М. Б.
ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ЭКСТРАКЦИИ БИОАКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ ИЗ ВИШНЕВОГО ЖМЫХА ..... 335

Bima P. Pratama, Aswin R. Khairullah, Ilma F. Ma'ruf, Adeyinka O. Akintunde, Imam Mustofa, Sri Mulyati, Riza Z. Ahmad, Arif N. M. Ansori
REVOLUTIONIZING CURCUMIN BIOAVAILABILITY: FROM HEALTH BENEFITS TO PLACEMENT IN FOOD PACKAGING PRODUCTS ..... 343

Посокина Н. Е., Захарова А. И.
СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ СЪЕДОБНЫХ ПОКРЫТИЙ ОВОЩЕЙ И ФРУКТОВ ..... 355

Mona A. Hassan, Mahmoud Salama, Ahmed A. Abd El-Maksoud
INFLUENCE OF ZINC-WHEY PROTEIN NANOPARTICLES IN FERMENTED MILK ON OXIDATIVE STRESS AND LIVER FUNCTION IN OBESE RATS ..... 362

Ландиховская А. В., Творогова А. А., Королев И. А.
ВЛИЯНИЕ ЗАМЕНИТЕЛЕЙ САХАРОЗЫ НА ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА МОРОЖЕНОГО В ПРОЦЕССЕ ПРОИЗВОДСТВА И ХРАНЕНИЯ ..... 370

Natalya Yu. Sharova, Artem O. Prichepa, Oxana V. Astafyeva, Nadezhda V. Kirillova
BIOSYNTHESIS OF PIGMENT BY STRAIN *ARTHROBACTER AGILIS* WB28 DURING FERMENTATION OF SECONDARY RAW MATERIALS ..... 378

Лукин Д. Е., Вострикова Н. Л., Большакова Л. С. , Куликовский А. В., Утьянов Д. А., Захарова В. А.
ПРИМЕНЕНИЕ СИАЙ-КОМПОНЕНТА ДЛЯ ОБОГАЩЕНИЯ ТОВАРНОГО ЯЙЦА ЙОДОМ ..... 386

Хворова Л. С., Андреев Н. Р., Бызов В. А.
ГЛЮКОЗА: ОСНОВНЫЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ИХ ПРАКТИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ ..... 393

Ким А. А., Баланов П. Е., Смотраева И. В.
ВЛИЯНИЕ ФЕРМЕНТАЦИИ БОБОВЫХ НА СНИЖЕНИЕ АНТИПИТАТЕЛЬНОГО ФАКТОРА. ОБЗОР ..... 401

Abdalla S. M. Ammar, Youssef M. Riyad, Mohamed I. Younis, Marwa R. Ali
VALORIZATION OF CITRUS FRUIT WASTES: SUSTAINABLE EXTRACTION OF BIOACTIVE COMPOUNDS FOR FOOD AND HEALTH APPLICATIONS ..... 407

Fatma Al-Zahraa Refat, Afaf O. Ali, Nashwa F. S. Morsy , Karima S. M. Hammad
UTILIZATION OF RESIDUES OF AJWAIN, SUMMER SAVORY AND OREGANO ESSENTIAL OILS DISTILLATION ..... 414

Филатова А. В., Азимова Л. Б., Раджабов О. И., Тураев А. С.
ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛИСАХАРИДОВ *FOENICULUM VULGARE* ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В КАЧЕСТВЕ БИОЛОГИЧЕСКИ АКТИВНОЙ ДОБАВКИ К ПИЩЕ ..... 423

Ambika Chaudhary, Neetu Singh, Alka Nanda, Prashant Pandey
OPTIMIZATION OF WHEAT AND SORGHUM SEERA (SORGWHEAT SEERA): EFFECT ON FUNCTIONAL, PHYSICOCHEMICAL AND STRUCTURAL PROPERTIES ..... 431

Лоскутов С. И., Пухальский Я. В., Чукаева М. А., Воробьев Н. И., Виноградов З. С. , Осипов А. И., Митюков А. С. , Тютюма Н. В., Бондаренко А. Н., Ситнов В. Ю.
ВЛИЯНИЕ ОРГАНИЧЕСКИХ ЭКСТРАКТОВ НА РАЗВИТИЕ РАСТЕНИЙ ГУАРА (*CYAMOPSIS TETRAGONOLOBA* (L) TAUB) В УСЛОВИЯХ ЗАКРЫТОГО ГРУНТА ..... 440

Никитина М. А., Горбунова Н. А.
АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ ..... 450

DOI: https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-3-316-323

Поступила 06.06.2025
Поступила после рецензирования 08.07.2025
Принята в печать 14.07.2025
© Петрунина И. В., Горбунова Н. А., Кузлякина Ю. А., Замула В. С., 2025
https://www.fsjour.com/jour
Обзорная статья
Open access

# РОЛЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ИННОВАЦИЙ В ОБЕСПЕЧЕНИИ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Петрунина И. В., Горбунова Н. А., Кузлякина Ю. А.*, Замула В. С.

Федеральный научный центр пищевых систем им. В. М. Горбатова, Москва, Россия

*КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:*
*инновационная деятельность, пищевая продукция, государственная поддержка, экономика, новые технологии, устойчивое развитие*

АННОТАЦИЯ

В статье рассмотрены вопросы применения в пищевой промышленности различных типов инноваций, разрабатываемых с целью сохранения необходимого уровня продовольственного обеспечения населения при одновременном соблюдении экологических норм и правил. При этом отмечено, что достижение устойчивого развития пищевой промышленности на основе инновационных подходов является сложной задачей, требующей концентрации усилий на нескольких направлениях деятельности. Обращено внимание на ряд проблем в аграрном секторе, обусловленных истощением природных ресурсов, загрязнением окружающей среды и другими неблагоприятными факторами. Среди них — системная проблема взаимодействия аграрного бизнеса и науки, связанная с недостаточным финансированием научных исследований в сфере инноваций и расхождениями в подходах к оценке их результатов. В современных экономических условиях дальнейшая интенсификация производства продуктов питания традиционными методами становится затруднительной. Это усиливает потребность в инновационных решениях, способных обеспечить высокое качество продукции и укрепить финансовое положение производителей. Коммерческий успех также в существенной степени зависит от реального учета запросов потребителей, исходя из возросших требований к обеспечению не только качества выпускаемой продукции, но и к ее безопасности для здоровья населения. В исследовании проанализированы показатели инновационной активности предприятий пищевой промышленности и структура расходов на различные направления инновационной деятельности. Рассмотрены основные формы государственной поддержки инноваций в Российской Федерации, включая ключевые аспекты законодательного регулирования данной сферы.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Статья подготовлена в рамках выполнения исследований по государственному заданию № FGUS-2024-0001 ФГБНУ «ФНЦ пищевых систем им. В. М. Горбатова» РАН.

**Received 06.06.2025**
**Accepted in revised 08.07.2025**
**Accepted for publication 14.07.2025**
© Petrunina I. V., Gorbunova N. A., Kuzlyakina Yu. A., Zamula V. S., 2025
**Available online at https://www.fsjour.com/jour**
**Review article**
**Open access**

# THE ROLE OF TECHNOLOGICAL INNOVATIONS IN ENSURING SUSTAINABLE DEVELOPMENT OF THE FOOD INDUSTRY

Irina V. Petrunina, Nataliya A. Gorbunova, Yulya A. Kuzlyakina*, Valentina S. Zamula

V. M. Gorbatov Federal Research Center for Food Systems, Moscow, Russia

*KEY WORDS:*
*innovation activities, food products, state support, economy, new technologies, sustainable development*

ABSTRACT

This article reviews the issues of applying various types of innovations in the food industry which innovations have been developed in order to maintain the required scope of food supply to population along with observing the environmental standards and rules. It is noted that achieving sustainable development of the food industry based on innovative approaches is a complex task that requires focusing efforts on several fields of activity. Attention is drawn to a number of challenges in the agricultural sector that have arisen due to the natural resources depletion, environmental pollution and due to other factors. These include, in particular, the presence of a systemic issue of interaction between agricultural business and science due to insufficient funding allocated for scientific research in the innovations field of and various approaches to the methods of their results evaluation. The current state of the economy does not allow any longer for further intensification of food production by traditional methods. Accordingly, the importance of those innovative projects finding is increasing, as their implementation will not only strengthen the financial well-being of the food products producers, but will also ensure high quality of food products. Commercial success dramatically depends on the real consideration of the consumers' demands, based on the increased requirements for not only ensuring high quality of the manufactured food products, but also their safety for public health. This article analyzes parameters and indicators which evidence the degree of innovative activity in the food industrial enterprises, and analyzes information on actual expenses in various areas of innovative activities. Some forms of state support for innovation in the Russian Federation are summarized, including review of legislative regulation of this field of activity.

FUNDING: The article was published as part of the research topic No. FGUS-2024-0001 of the state assignment of the V. M. Gorbatov Federal Research Center for Food Systems of RAS.

## 1. Введение

Инновации в мировой продовольственной системе направлены на решение двух ключевых задач: на обеспечение продовольственной безопасности и на защиту окружающей среды. Для достижения этих целей могут применяться различные методы и подходы с учетом региональных особенностей, накопленного опыта, финансовых возможностей и других условий.

Многообразие этих и других факторов в некоторых случаях существенно затрудняет разработку и принятие эффективных инновационных решений. Поэтому неудивительно, что в указанной сфере имеются как очевидные достижения, так и определенные неудачи.

Объективным сложностям, возникающим при реализации новых идей, уделяется внимание в разнообразных дебатах о роли инноваций в продовольственном секторе и о степени их влияния на

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: **Петрунина И. В., Горбунова Н. А., Кузлякина Ю. А., Замула В. С.** (2025). Роль технологических инноваций в обеспечении устойчивого развития пищевой промышленности. *Пищевые системы*, 8(3), 316–323. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-3-316-323

FOR CITATION: **Petrunina, I. V., Gorbunova, N. A., Kuzlyakina, Yu. A., Zamula, V. S.** (2025). The role of technological innovations in ensuring sustainable development of the food industry. *Food Systems,* 8(3), 316–323. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-3-316-323

процессы устойчивого развития [1,2]. По мнению ряда экспертов, утверждения о прямой зависимости между устойчивым развитием и инновациями остаются дискуссионными [3]. Тем не менее, как показывает практика, широкое применение инноваций в пищевой промышленности играет ключевую роль не только в укреплении отрасли, но и в обеспечении социальной устойчивости [4].

Действительно, в связи с ростом численности населения и с необходимостью сохранения приемлемого уровня жизни, поиск эффективных путей обеспечения населения / потребителей продовольствием остается крайне актуальной задачей. С одной стороны, потребность в продуктах питания стимулирует формирование и развитие крупной пищевой промышленности [5]. В то же время во многих странах агропродовольственный сектор сталкивается с рядом трудностей из-за истощения природных ресурсов и загрязнения окружающей среды. Это обстоятельство существенно затрудняет процессы производства продуктов питания в требуемых объемах и в должном качестве. Поэтому крайне важным является повсеместное распространение нового подхода к организации производственной деятельности, получившего название «Ответственная промышленность». Подход предусматривает более объективную оценку воздействия производственных процессов на окружающую среду, условия жизни населения и иные социально-экономические аспекты [6].

Стремление увеличить объемы производства пищевой продукции посредством создания новых предприятий и/или повышением мощности действующих лишь частично снижает остроту имеющихся проблем в обеспечении продовольствием. Дополнительной трудностью является повышенный уровень волатильности современных экономических процессов, имеющих глобальное значение.

В этой ситуации качественно новым способом повышения эффективности экономики становится разработка и внедрение инноваций, которые способствуют укреплению устойчивости цепочек производства, распределения и потребления продовольственных товаров [7,8,9].

Как показывает практический опыт, успешное функционирование и развитие пищевой промышленности в странах с ведущим влиянием на мировую экономику во многом зависит от способности прогнозировать и гибко реагировать на изменяющиеся внешние условия. Применение передовых производственных технологий позволяет таким государствам сохранять и укреплять конкурентные преимущества на глобальном рынке [10].

В этой связи необходимо скорректировать методы работы на тех предприятиях пищевой промышленности, которые в своей деятельности главным ориентиром ставят минимизацию производственных затрат и поэтому гораздо меньше внимания уделяют изучению интересов и предпочтений потребителей своей продукции. Несмотря на предпринимаемые в последние годы меры по повышению качества и безопасности пищевой продукции, во многих предприятиях отрасли инновационный потенциал по-прежнему используется недостаточно — как в организации производства, так и при формировании ассортимента [11].

В целом, стратегическое управление инновационной деятельностью аграрных предприятий подразумевает активный поиск и реализацию тех инновационных проектов, которые обеспечат стабильное и прибыльное развитие в долгосрочной перспективе. Определение конкретной инновационной стратегии зависит от текущего состояния предприятия — включая доступность финансовых ресурсов — и от особенностей конкурентной среды в соответствующей сфере деятельности [12].

Исходя из указанных обстоятельств, следует обратить внимание, что ранее многие компании могли сосредоточить усилия на улучшении лишь одного-двух типов инноваций. Например, повысить качество продукции и усовершенствовать ее особые характеристики. Или добиться снижения производственных затрат и, соответственно, цены реализации продукции. Также можно было ограничиться улучшением сервиса и системой продвижения товара. В настоящее время для достижения и сохранения конкурентного преимущества необходимо задействовать весь производственный потенциал и развивать одновременно максимально возможное количество инноваций в используемой бизнес-модели. Такой подход требует формирования точной стратегии развития, предусматривающей постоянный поиск и внедрение передовых технологий во все сферы деятельности компании [13].

Целью данного исследования является анализ современного состояния аграрного сектора, определение роли технологических инноваций в его развитии в контексте устойчивости, а также оценка перспективных направлений создания и внедрения инноваций в пищевой промышленности.

## 2. Материалы и методы

В основу научного исследования положены статьи, опубликованные в базах данных Scopus, Google Scholar, Science Direct, eLibrary. Кроме того, приведены показатели Федеральной службы государственной статистики, официальные законодательные и нормативные акты государственных органов Российской Федерации.

Для предметного исследования затронутых в статье вопросов были проанализированы научные публикации российских и зарубежных авторов, непосредственно касающиеся разработки и внедрения инноваций в производственные и иные процессы в пищевой промышленности.

Литературный обзор проводился следующим образом: отбор источников осуществлялся по ключевым словам и словосочетаниям, соответствующим теме исследования.

На первом этапе работы проанализированы источники, посвященные уровню и динамике инновационного развития экономики страны. На втором этапе изучены документы, в которых приведена оценка показателей для измерения эффективности инноваций в пищевой промышленности. Соответствующие статьи были проанализированы с использованием как библиометрического, так и системного подхода.

Актуальность исследования обусловлена взаимосвязью между разработкой новых технологий и продуктов, экологической устойчивостью и изменяющимися ожиданиями потребителей. Необходима всесторонняя оценка жизненного цикла продукта с учетом запланированных изменений, направленных на повышение его качества и устойчивости

## 3. Результаты и обсуждение

Состояние современной мировой экономики характеризуется усилением глобальной конкуренции и интенсивной технологической трансформацией рынков. В этих условиях применение опережающих инновационных решений в практической деятельности имеет важнейшее значение для финансовой устойчивости компаний. Таким образом, внедрение различных видов инноваций становится определяющим конкурентным преимуществом в предпринимательской среде [14].

Однако имеется противоречие между необходимостью ускорения инновационного развития и ограниченностью внутренних ресурсов предприятий для реализации крупных инновационных проектов. Кроме того, по-прежнему сильны позиции многих сторонников традиционных форм экономического развития, которые весьма критически относятся к инновационным моделям организации бизнеса и преуменьшают их эффективность для хозяйствующих субъектов [15].

### *3.1. Типы инноваций*

Существует несколько классификаций инноваций, используемых в экономической литературе. Среди зарубежных экспертов наиболее часто упоминаются открытые и устойчивые типы инноваций.

*Открытые инновации* ориентированы на активный поиск внешних идей, решений и технологий, а также на обмен передовым опытом с другими партнерами в различных формах, включая проведение совместных целевых исследований между университетами и научно-исследовательскими институтами. Кроме того, в рамках такого сотрудничества могут быть созданы совместные предприятия, деятельность которых направлена на улучшение экономических связей с поставщиками, клиентами и потребителями. Это позволяет максимально использовать как собственный творческий потенциал, так и информационный опыт других коллективов, что ускоряет внедрение более успешных методов ведения бизнеса [16–20].

К наиболее важным факторам, способствующим внедрению модели открытых инноваций, относят повышение конкурентоспособности и увеличение срока действия того или иного конкурентного преимущества [11].

Таким образом, использование открытых инноваций может стать основным преимуществом для различных компаний, в том числе занятых производством пищевой продукции. В настоящее время объем инвестиций в исследования и разработки пищевой промышленности, включая практические испытания новых видов продукции, явно недостаточен [21].

*Устойчивые инновации* характеризуются использованием стратегического подхода, при котором приоритет отдается разработке и внедрению новых идей, процессов и продуктов с акцентом на экологические, социальные и экономические факторы, имеющие долгосрочный характер. Таким образом, устойчивые инновации нацелены на решение разного рода проблем с более ответственным использованием

ресурсов и минимизацией негативного воздействия на окружающую среду на протяжении всего цикла производства и применения продукции [18]. При этом компании, внедряющие устойчивые инновации, ориентируются на создание продуктов и услуг, которые удовлетворяют текущие потребности населения, не ограничивая возможности их удовлетворения для будущих поколений [22].

Следует обратить внимание, что использование открытых и устойчивых инноваций, как правило, является взаимосвязанным процессом, который существенно усиливает их положительное влияние, облегчая поиск оптимальных решений с привлечением разнообразного опыта [18,23]. Например, открытые инновации предоставляют партнерам возможность применения необходимых средств для доступа к различным внешним источникам (экспертным мнениям и другой полезной информации) и тем самым повышают эффективность при разработке и внедрении устойчивых инноваций [24].

Проводимый анализ оценки жизненного цикла (LCA) и качества продукции путем использования соответствующих инструментов и методологии имеет важнейшую роль как в открытых, так и в устойчивых инновациях, поскольку позволяет проводить более целостную оценку инноваций. Компании в рамках сотрудничества могут совместно анализировать экологические и качественные аспекты, касающиеся новых идей, технологий и материалов, независимо от того, где они возникают. Подобный комплексный подход способствует выявлению инноваций, которые соответствуют как целям устойчивого развития, так и стандартам качества [25–27].

В научных работах по экономике в России чаще используется другая система классификации инноваций. К ним относят такие их виды, как управленческие, маркетинговые, экологические и технологические [13,28,29].

*Управленческие* (организационные) *инновации* направлены на совершенствование хозяйственных и производственных связей, а также на внедрение новых форм организации труда — таких как создание стратегий управления персоналом и повышение квалификации сотрудников, что значительно повышает потенциал данного вида инноваций. Помимо этого, указанные инновации включают разработку новых систем контроля и оценки качества продукции.

*Маркетинговые инновации* в первую очередь предусматривают исследование текущего состояния и перспективного развития рынков сбыта сырья, продукции и поиск новых потребителей и партнеров. Эти действия основаны на сборе и анализе информации о конкурентах, на использовании новых методов и инструментов для продвижения и продажи своих товаров и услуг, а также на разработке более гибких стратегий в ценообразовании.

*Экологические инновации* включают проведение различных мероприятий по улучшению экологической обстановки в сфере производства продуктов питания с использованием новых подходов к ресурсосбережению.

*Технологические инновации имеют ключевое значение для модернизации производств и повышения их эффек*тивности и разделяются на два типа: продуктовые и процессные [30].

Продуктовые инновации представляют собой новые или улучшенные продукты с дополнительными характеристиками. Они включают в себя разработку и выпуск экологически чистых товаров для массового потребления; продуктов, способствующих укреплению здоровья и профилактике заболеваний; отдельных видов продовольствия для конкретных групп населения, включая детей.

Процессные инновации связаны с разработкой и внедрением усовершенствованных производственных методов, которые направлены на оптимизацию различных технологических процессов. Они также включают разработку более эффективных способов упаковки и транспортировки товаров.

Все упомянутые виды инноваций в той или иной мере взаимосвязаны, поэтому их целесообразно использовать комплексно. В этом случае достигается наибольший эффект [31].

### *3.2. Меры по обеспечению устойчивого развития АПК*

В научных исследованиях, касающихся устойчивого развития аграрного сектора, в основном изучаются влияние и взаимодействие трех факторов: экономического, экологического и социального [32]. Успешный баланс между ними может быть достигнуть за счет активного развития инноваций.

Поэтому в современных условиях важнейшим элементом развития и устойчивого функционирования любого предприятия является его инновационная политика, в частности, развитие технологических инноваций и связь их с открытыми инновациями.

Открытые инновации и новые технологии являются определяющим фактором для осуществления процессов качественного улучшения систем управления в АПК. Их применение дает возможность более эффективно осваивать плодородные сельскохозяйственные земли для удовлетворения потребностей растущего населения, а также осуществлять более высокими темпами модернизацию аграрных технологий, оборудования. Кроме того, использование этих инструментов позволяет снизить уровень потенциальных рисков при производственной деятельности [33].

Достижение устойчивого развития пищевой промышленности на основе инновационных принципов является не только актуальной, но и достаточно сложной задачей, выходящей за рамки лишь одной проблемы, например, экологической [34,35]. Поэтому агропродовольственный сектор нуждается в инновациях, позволяющих решать целый комплекс вопросов. К ним относятся: обеспечение продовольствием населения; восстановление и/или снижение уровня истощения ресурсов; внедрение новых процессов глубокой переработки пищевых и иных видов отходов, возникающих в производственной сфере [9].

Разработку и принятие актуальных мер для практического воплощения указанных выше направлений деятельности следует проводить на основе целевых исследований, предусматривающих, в частности, изучение наиболее эффективных форм партнерского сотрудничества и иных связей между различными отраслями (включая пищевую промышленность), регионами, а также общественными структурами. В этой связи следует обратить внимание, что необходимость обеспечения устойчивости (в широком смысле) становится важнейшим моральным и экономическим императивом из-за наличия тесных взаимных связей между природной средой, обществом и деловой активностью [36].

Концептуальная модель формирования стратегии развития инновационно-инвестиционной деятельности аграрных предприятий предусматривает конкретный набор инновационных действий на всех стадиях реализации стратегии. Основным ориентиром является, как правило, повышение конкурентоспособности продукции, что способствует прочному закреплению позиции на продовольственном рынке [37].

### *3.3. Роль потребителей пищевой продукции в инновационном развитии пищевой промышленности*

Как показывает международный и отечественный опыт, учет мнений потребителей уже на ранних стадиях процесса разработки новых видов продуктов является важным фактором коммерциализации успеха, поскольку требования потребителей к безопасным, здоровым, качественным и удобным продуктам питания постоянно растут [38].

В отличие от других отраслей, технологическое развитие в пищевой промышленности практически не устаревает: новые технологии не заменяют старые, а дополняют и развивают их. Это снижает давление на потребителей, связанное с необходимостью принятия инноваций [39].

Социально-экономические изменения последних десятилетий в контексте глобализации рынков, усиления экологических требований и роста внимания к безопасности пищевых продуктов привели к большей осознанности выбора со стороны потребителей. Технологии, разработанные в области генетики, новых материалов и коммуникаций, фактически произвели революцию в производстве продуктов питания. Представление о еде изменилось, превратившись из банального потребительского товара, необходимого для удовлетворения основных потребностей человека, в продукт, тесно связанный со здоровьем человека, сохранением окружающей среды, социальной справедливостью и развитием новых видов экономической деятельности [40].

Экспертами отмечается, что в последние годы у многих российских потребителей повысился интерес к новым разнообразным продуктам, имеющим дополнительные функциональные характеристики при одновременном отсутствии в них вредных компонентов. Поэтому среди населения сформировался тренд индивидуализированного подбора продуктов на основании особенностей организма и вкусовых предпочтений [41].

Инновации в пищевой промышленности могут происходить на этапах:

- использования новых ингредиентов;
- создания продуктов питания минимально обработанных;
- организации производственных (технологических) процессов;
- улучшения качества продукции;
- применения новых видов упаковок и технологий хранения;
- доставки продукции (новых логистических подходов) и/или маркетинга.

Например, развитие исследований в части новых упаковочных технологий осуществляется по пяти основным направлениям, предусматривающим использование тонких прозрачных покрытий, наносимых вакуумным способом; новых барьерных полимеров в виде отдельных слоев; смесей барьерных полимеров и стандартных полимеров; органических барьерных покрытий; нано-композитных материалов [42].

Таким образом, социально-экономическая ситуация в мире, сложившаяся в результате глобализации рынков, а также на фоне установления новых требований к охране окружающей среды и безопасности пищевых продуктов, сказывается на предпочтениях потребителей. Кроме того, ряд технологий, разработанных в области генетики, а также выпуск новых материалов и оборудования оказывают значительное влияние на сферу производства продуктов питания. Представление о них как о простом потребительском товаре для удовлетворения основных жизненных потребностей существенно изменилось. Теперь одними из важнейших составляющих в процессе выпуска указанной продукции являются такие факторы, как улучшение здоровья человека, сохранение окружающей среды, обеспечение социальной справедливости.

*3.4. Особенности взаимодействия аграрного бизнеса и науки*

В настоящее время сохраняются сложности с налаживаем стабильных и эффективных форм диалога аграрного бизнеса и научного сообщества. И дело не только в том, что научные учреждения часто не имеют возможности проводить необходимый объем исследований в сфере инноваций. Существует также острая нехватка не только квалифицированных специалистов, но и тех сотрудников, которые заинтересованы в достижении значимых результатов, несмотря на то, что их научная деятельность не всегда предоставляет возможность обеспечить высокий уровень дохода.

Нередко возникают серьезные разночтения в обозначении приоритетов между представителями научного сообщества и бизнес-структур. Институты и другие научно-исследовательские организации, получая финансирование на выполнение соответствующих работ, не всегда озабочены их практической ценностью, т. е. реальным воплощением результатов тех или иных научных достижений. В ряде случаев первичным стимулом становится возможность провести новые научные исследования по актуальной теме, а их результаты могут оказаться самыми разными.

В то же время предприниматели, инвестируя в научно-исследовательскую деятельность, надеются получить конкретные инновационные решения, учитывающие особенности деятельности их компаний и обеспечивающие определенный экономический эффект. Очевидно, что мало кто из представителей науки согласится дать гарантию, что результат их исследований будет именно таким. Особенно, если заказчиком изначально ставится задача достижения улучшенных финансовых результатов работы его предприятия при условии внедрения соответствующих инновационных разработок [43].

Следует также отметить, что в некоторых случаях научные коллективы презентуют потенциальным заказчикам свои творческие идеи в форме, мало понятной представителям бизнеса. Или же предприниматели некорректно формулируют основную цель предполагаемых научных исследований [44].

*3.5. Государственная поддержка инноваций в России. Анализ итогов инновационной деятельности предприятий пищевой промышленности*

Многие руководители аграрных предприятий называют административные барьеры основным препятствием для инновационного роста. Это замечание также относится к системе нормативно-правового регулирования аграрной деятельности, которая остается недостаточно проработанной и не учитывает специфику современного бизнеса. Контрольно-надзорная нагрузка со стороны государственных органов является, по мнению предпринимателей, чрезмерной, что создает дополнительные проблемы для использования инновационных решений [45].

Указанные административные барьеры оказывают отрицательное влияние даже при использовании государственных ресурсов. Тем более, их объем часто является весьма ограниченным. Средства, как правило, выделяются на инновации с ограниченным уровнем риска и с учетом социальных приоритетов. Соответственно, крупные новаторские идеи, для реализации которых требуются более значительные ресурсы, остаются без должной бюджетной поддержки.

Что касается банковских кредитов, оформляемых для финансирования инноваций, то современные условия получения заемных средств стали чересчур обременительны для предпринимателей пищевой промышленности и других отраслей российского АПК. Поэтому для аграриев остается крайне острой проблема получения необходимого объема бюджетного финансирования, а принятие различного рода государственных программ по поддержке инноваций не всегда позволяет решать эту проблему [46]. Хотя целенаправленная нормативно-правовая деятельность в сфере поддержки инноваций может оказать существенное положительное влияние на этот процесс.

В этой связи рассмотрим некоторые законодательные акты Российской Федерации, направленные на дальнейшее инновационное развитие страны.

Из правовых актов, принятых в последние годы, наиболее важное значение имеют следующие: Концепция технологического развития на период до 2030 года[1]; Национальные цели развития Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2036 года[2]; Стратегия научно-технологического развития Российской Федерации[3].

Этими документами определены новые направления экономической трансформации Российской Федерации, связанные с внедрением и использованием инноваций.

В частности, Концепция технологического развития на период до 2030 года предусматривает поддержку высокотехнологичных отраслей российской экономики с принятием конкретных мер по обеспечению технологического суверенитета страны, переходу к инновационно ориентированному экономическому росту и устойчивому развитию на основе широкой модернизации различных производственных систем.

В Стратегии научно-технологического развития России основное внимание уделяется созданию инфраструктуры и условий, отвечающих современным принципам организации научной, научно-технической и инновационной деятельности, основанных на лучших российских и мировых практиках, для проведения исследований, осуществления разработок и внедрения наукоемких технологий. Указанная Стратегия должна использоваться при разработке отраслевых документов стратегического планирования в области научно-технологического развития и государственных программ инновационного направления.

Таким образом, на ее основе может быть разработана отраслевая программа по внедрению инноваций в пищевой и перерабатывающей промышленности.

Рассмотрим особенности инноваций в практической деятельности отечественных предприятий пищевой промышленности за последние годы на основе статистических данных Росстата (Таблицы 1–6)[4].

В Таблице 1 отражены показатели, позволяющие оценить уровень изменений инновационной составляющей в деятельности компаний, занимающихся производством продуктов питания.

Таблица 1. **Инновационная деятельность организаций**
Table 1. **Innovation activity of the enterprises**

| | 2020 г. | 2021 г. | 2022 г. | 2023 г. |
|---|---|---|---|---|
| Уровень инновационной активности организаций, % | 13,4 | 16,9 | 12,9 | 16,7 |
| Удельный вес организаций, осуществляющих технологические инновации, % | 17,3 | 16,1 | 14,9 | 13,6 |
| Отгружено инновационных товаров собственного производства, выполнено работ и оказано услуг собственными силами, млрд руб. | 245,56 | 322,51 | 376,99 | 290,37 |
| Удельный вес инновационных товаров, работ и услуг в общем объеме отгруженных товаров, выполненных работ, услуг, % | 5,0 | 5,3 | 5,1 | 3,7 |

Как следует из приведенных данных, уровень инновационной активности указанных компаний за рассматриваемый период увеличился на 3,3 процентных пункта. При этом доля компаний в отрасли,

[1] Концепция технологического развития на период до 2030 года — утверждена распоряжением Правительства РФ от 20.05.2023 № 1315-р.

[2] Указ Президента РФ от 07.05.2024 № 309 «О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2036 года».

[3] Указ Президента РФ от 28.02.2024 № 145 «О Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации».

[4] Федеральная служба государственной статистики Электронный ресурс: http://rosstat.gov.ru.Дата доступа 16.05.2025.

внедряющих технологические инновации к концу 2023 года, снизилась на 3,7 процентных пункта. Одновременно объем отгруженной инновационной продукции собственного производства активно увеличивался и составил 118,2 % по сравнению с уровнем 2020 года. Однако в общем объеме производства удельный вес инновационной продукции снизился до 3,7 %, что на 1,3 процентных пункта меньше, чем в начале исследуемого периода.

В Таблице 2 представлены виды расходов, связанных с различными направлениями инновационной деятельности в сфере производства пищевых продуктов.

Таблица 2. **Структура затрат на инновации, млн руб.**
Table 2. **Structure of costs for innovations, million rubles**

| | 2020 г. | 2021 г. | 2022 г. | 2023 г. |
|---|---|---|---|---|
| **Затраты на инновационную деятельность** | **28510,1** | **35901,4** | **37611,3** | **40392,5** |
| *в том числе:* | | | | |
| — исследования и разработки | 11718,4 | 3159,8 | 3227,3 | 3451,2 |
| — приобретение машин и оборудования, прочих основных средств | 13435,6 | 21370,1 | 29501,6 | 29066,7 |
| — маркетинг и создание бренда | 179,6 | 194,1 | 129,6 | 322,4 |
| — обучение и подготовка персонала | 41,1 | 23,7 | 27,9 | 20,7 |
| — дизайн | 686,8 | 397,4 | 491,1 | 533,1 |
| — инжиниринг | 511,8 | 510,9 | 176,3 | 123,9 |
| — разработка и приобретение программ ЭВМ и баз данных | 149,9 | 260,3 | 245,7 | 227,3 |
| — приобретение прав на результаты интеллектуальной деятельности | 28,5 | 597,2 | 337,8 | 1011,0 |
| — планирование, разработка и внедрение новых методов ведения бизнеса, организация рабочих мест и внешних связей | 21,7 | 38,8 | 12,8 | 49,3 |
| — прочие затраты | 1735,7 | 9349,1 | 3461,2 | 5586,9 |

Как видно из Таблицы 2, имеются значительные расхождения между различными направлениями инновационной деятельности. За рассматриваемый период увеличились расходы на приобретение прав на патенты. Также выросли затраты на разработку и внедрение инновационных подходов к управлению бизнесом, на маркетинговые исследования и на покупку программных средств. Одновременно с этим уменьшились расходы на исследования и разработки, инжиниринг. Самый низкий уровень затрат отмечен при внедрении предприятиями новшеств по обучению и подготовке персонала, которые составили в 2023 году лишь 0,1 % от всех расходов на инновационные цели.

В структуре затрат на технологические инновации значительную долю занимают расходы на машины и оборудование. В 2023 году их доля составила 72 %. В 2020 году этот показатель был на уровне 47,1 %. Таким образом, инвестиции в современное оборудование и машины обеспечили наибольший эффект по сравнению с другими видами инноваций.

Специфика количественных и качественных характеристик инновационных расходов во многом обусловлена текущей ситуацией с финансированием этого сегмента экономики, где основным источником выступают внутренние ресурсы организаций (Таблица 3).

Таблица 3. **Финансирование инновационной деятельности**
Table 3. **Innovation activities funding**

| Источник | 2020 г. | 2021 г. | 2022 г. | 2023 г. |
|---|---|---|---|---|
| **Всего** — млн руб. | **28510,1** | **35901,4** | **37611,3** | **40392,5** |
| — собственные средства организаций | 25565,7 | 28296,6 | 32856,6 | 30883,2 |
| — федеральный бюджет | 65,3 | 258,8 | 129,9 | 287,7 |
| — бюджеты субъектов РФ и местные бюджеты | 36,2 | 18,0 | 15,9 | — |
| — фонды поддержки научной, научно-технической и инновационной деятельности | 0,2 | — | — | — |
| — иностранные инвестиции | 683,7 | 202,6 | — | — |
| — прочие средства | 2159,0 | 7125,4 | 4608,9 | 9221,6 |

Так, доля собственных средств в общем объеме затрат на инновации составила 76,5 % в 2023 году. Государственные инвестиции из средств федерального бюджета составили около 1 % расходов на указанные цели. Как видно из указанной таблицы, в 2021–2023 годах не выделялись средства фондов поддержки научной, научно-технической и инновационной деятельности. Что касается иностранных инвестиций, то в 2022 и 2023 годах они полностью отсутствуют.

Следует обратить внимание на следующее обстоятельство. Несмотря на рост числа научно-исследовательских учреждений (с 2020 по 2023 годы — в 5,1 раза), количество сотрудников, занятых в сфере исследований и разработок, уменьшилось на 3,3 % (с 2445 чел. до 2364 чел.). Это становится серьезной проблемой для реализации инновационного пути развития производства пищевых продуктов.

Приведены данные, характеризующие уровень инновационной активности предприятий по производству пищевых продуктов в динамике за несколько лет (Таблица 4).

Таблица 4. **Динамика инновационной активности предприятий**
Table 4. **Dynamics of the enterprises' innovation activity**

| | 2020 г. | 2021 г. | 2022 г. | 2023 г. | 2023 г. в % к 2020 г. |
|---|---|---|---|---|---|
| Всего затрат на инновационную деятельность, млрд руб. | 2134,04 | 2379,71 | 2662,57 | 3519,54 | 164,9 |
| Затраты на инновации в производстве пищевой продукции, млрд руб. | 28,51 | 35,90 | 37,61 | 40,39 | 141,7 |
| Удельный вес затрат на инновации от всего объема затрат, % | 1,34 | 1,51 | 1,41 | 1,15 | 85,8 |
| Всего инновационных товаров, млрд руб. | 5189,05 | 6003,34 | 6377,25 | 8323,89 | 160,4 |
| Выпуск пищевой инновационной продукции, млрд руб. | 245,56 | 322,51 | 376,99 | 290,37 | 118,2 |
| Удельный вес пищевой продукции в общем выпуске товаров, % | 4,73 | 5,37 | 5,91 | 3,49 | 73,8 |

Исследование изменений в инновационной активности организаций за рассматриваемый период времени показывает, что целевые вложения в развитие инноваций значительно выросли. Так, объем инвестиций с 2020 по 2023 год увеличился почти на 42 % и достиг 40,39 млрд рублей. Эти изменения отразились на производстве инновационной пищевой продукции, объем которой вырос на 18,2 %.

В Таблице 5 рассмотрены затраты на инновационные цели предприятий по переработке и консервированию мяса (включая убой животных, производство мяса, субпродуктов и животных жиров), а также по производству мясной продукции.

Таблица 5. **Инновационные затраты предприятий, млн руб.**
Table 5. **Innovation costs of the enterprises, million rubles**

| | 2020 г. | 2021 г. | 2022 г. |
|---|---|---|---|
| **Затраты на инновационную деятельность** | | | |
| Всего: | 460,38 | 1066,32 | 1365,50 |
| — переработка и консервирование мяса | 176,52 | 294,61 | 185,18 |
| — производство мясной продукции | 283,86 | 771,71 | 1050,42 |
| **Объем отгруженной инновационной продукции** | | | |
| Всего: | 45478,03 | 44933,53 | 57860,63 |
| — переработка и консервирование мяса | 13669,15 | 4468,25 | 3900,46 |
| — производство мясной продукции | 31908,88 | 40465,28 | 53960,17 |
| в т. ч. **инновационная продукция, произведенная по новым технологиям** | | | |
| Всего: | 43159,32 | 36009,12 | 55934,23 |
| — переработка и консервирование мяса | 12394,75 | 4468,25 | 3897,93 |
| — производство мясной продукции | 30764,57 | 31540,87 | 52036,30 |

В последнее время в мясной отрасли отмечается активизация инновационной деятельности предприятий. Если в 2020 году удельный вес затрат предприятий по переработке мяса составлял 38,3 %, то в 2022 году этот показатель снизился до 13,6 % в общем объеме затрат. За рассматриваемый период затраты на инновации в производстве мясной продукции увеличились в 3,7 раза и составили в 2022 году 86,4 % от общих затрат по отрасли.

Некоторые другие показатели также демонстрируют стабильный рост. Например, за данный период времени рост объема инновационной мясной продукции составил 127,2 %, или увеличился на 12382,6 млн руб. В сегменте переработки мяса объем поставок, напротив, снизился на 71,5 %. При этом в производстве мясных изделий отмечался прирост отгрузки такой продукции на 69,1 %.

Аналогичная ситуация наблюдается в отношении продукции, произведенной с применением новых технологий. В частности, расходы на технологические новшества с 2020 года по 2022 год выросли в целом на 12774,91 млн руб. (или на 129,6 %), в производстве мясных изделий — на 21271,73 млн руб. (+ 69,1 %), а в переработке мяса снизились на 8496,12 млн руб. (или на 69 %).

Данные, представленные в Таблице 6, характеризуют растущий интерес к инновациям в области производства мясной продукции по отдельным видам.

Таблица 6. **Затраты на инновационную деятельность предприятий по производству мясной продукции, тыс. руб.**
Table 6. **Costs for innovation activities of meat products producing enterprises, thousand rubles**

| | 2020 г. | 2021 г. | 2022 г. |
|---|---|---|---|
| Изделия колбасные | 243 424,3 | 291 758,8 | 488 179,3 |
| Полуфабрикаты | 19 567,9 | 445 151,0 | 328 893,6 |
| Продукты из мяса | 4 396,0 | 15 149,5 | 13 642,8 |
| Консервы | 5 889,4 | 18 386,3 | 181 370,0 |
| Мука и гранулы, непригодные в пищу | 885,0 | 1 221,0 | 1 031,0 |

В период с 2020 года по 2022 год инновационная активность предприятий показала положительную тенденцию к увеличению. Более всего выросли затраты в производстве консервов (в 30 раз) и полуфабрикатов (в 17 раз). Также повышение наблюдалось и в производстве продуктов из мяса (в 3,1 раза), колбасных изделий (в 2 раза).

Пищевая промышленность по уровню потребления продукции значительно опережает рынки других товаров. Она объединяет тысячи предприятий, производит пятую часть национального продукта России. Эта сфера производства обеспечивает продовольственную безопасность страны, что имеет важнейшее социально-политическое значение для существования самого государства. Кроме того, пищевая промышленность тесно связана со многими смежными отраслями: сельское хозяйство, химическая и машиностроительная промышленности [47].

## 4. Выводы

Результаты проведенного анализа подтверждают роль инноваций и устойчивого развития как ключевых движущих сил в пищевой промышленности.

В современных условиях важнейшим элементом развития и устойчивого функционирования любого предприятия является его инновационная политика, в частности, развитие технологических инноваций и связь их с открытыми инновациями. В последние годы предприятия пищевой промышленности (в том числе мясной отрасли) заинтересованы более активно внедрять инновации, которые представляют собой инструмент роста и повышения их эффективности, становясь таким образом инструментом улучшения и дифференциации продуктов на рынке.

Эти цели предусматривают как модернизацию технологического оборудования, так и использование новых подходов к организации управления персоналом предприятий и непосредственно производственными процессами на разных их стадиях, совершенствование логистики. Перспективными направлениями представляются инновационные решения в области создания различных пищевых продуктов, включая мясные изделия в соответствии со стандартами качества.

На указанных предприятиях наибольшую готовность к внедрению демонстрируют инновационные разработки в сфере цифровых технологий, роботизированных линий, отдельных видов высокопроизводительного и экономически эффективного оборудования, а также решений, ориентированных на кастомизацию продуктов. Кроме того, важным направлением деятельности является внедрение методов, позволяющих эффективно использовать и перерабатывать вторичные (побочные) ресурсы и отходы, образующиеся в процессе работы предприятий пищевой промышленности, с целью защиты окружающей среды, более рационального использования материальных и природных ресурсов.

Для ускорения процессов разработки и внедрения инновационных достижений необходимо решить несколько масштабных проблем. В частности, со стороны государственных структур и предпринимательского сообщества целесообразно существенно увеличить объемы финансовой поддержки соответствующих научных исследований.

В условиях постоянного изменения спроса и предложения, а также обострения конкуренции между компаниями в пищевой промышленности инновации стали не только неизбежными, но и крайне важными для роста и прибыльности пищевой промышленности.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / REFERENCES


1. Bigliardi, B., Galati, F. (2013). Models of adoption of open innovation within the food industry. *Trends in Food Science and Technology,* 30(1), 16–26. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2012.11.001
2. Stanco, M., Nazzaro, C., Lerro, M., Marotta, G. (2020). Sustainable collective innovation in the agri-food value chain: The case of the «Aureo» wheat supply chain. *Sustainability*, 12(14), Article 5642. https://doi.org/10.3390/su12145642
3. Rauter, R., Perl-Vorbach, E., Baumgartner, R. J. (2017). Is open innovation supporting sustainable innovation? Findings based on a systematic, explorative analysis of existing literature. *International Journal of Innovation and Sustainable Development,* 11(2/3), Article 249. https://doi.org/10.1504/IJISD.2017.083289
4. Franceschelli, M. V., Santoro, G., Candelo, E. (2018). Business model innovation for sustainability: A food start-up case study. *British Food Journal*, 120(10), 2483–2494. https://doi.org/10.1108/BFJ-01-2018-0049
5. Şimşek, E. K., Kara, M., Kalıpçı, M. B., Eren, R. (2024). Sustainability and the food industry: A bibliometric analysis. *Sustainability*, 16(7), Article 3070. https://doi.org/10.3390/su16073070
6. Hahn, K. (2020). Opportunities for Socially Responsible Industry 4.s. *IEEE Engineering Management Review*, 48(1), 63–70. https://doi.org/10.1109/EMR.2020.2969407
7. Silva, R. F. M. da, Papa, M., Bergier, I., Oliveira, S. R. M. de, Cruz, S. A. B. da, Romani, L. A. S. et al. (2022). Digital transformation for improving sustainable value of products and services from agri-food systems. *Frontiers in Sustainability*, 3, Article 1048701. https://doi.org/10.3389/frsus.2022.1048701
8. McGreevy, S. R., Rupprecht, C. D., Niles, D., Wiek, A., Carolan, M., Kallis, G. et al. (2022). Sustainable agrifood systems for a post-growth world. *Nature Sustainability*, 5(12), 1011–1017. https://doi.org/10.1038/s41893-022-00933-5
9. Klerkx, L., Rose, D. (2020). Dealing with the game-changing technologies of Agriculture 4.0: How do we manage diversity and responsibility in food system transition pathways? *Global Food Security*, 24, Article 100347. https://doi.org/10.1016/j.gfs.2019.100347
10. Leong, W. D., Lam, H. L., Ng, W. P. Q., Lim, C. H., Tan, C. P., Ponnambalam, S. G. (2019). Lean and green manufacturing — A review on its applications and impacts. *Process Integration and Optimization for Sustainability*, 3(2), 5–23. https://doi.org/10.1007/s41660-019-00082-x
11. Bigliardi, B., Ferraro, G., Filippelli, S., Galati, F. (2020). Innovation models in food industry: A review of the literature: Innovation models in food industry. *Journal of Technology Management and Innovation*, 15(3), 97–108. https://doi.org/10.4067/S0718-27242020000300097
12. Джавадова, С. А., Молчанова Л. А. (2021). Инновационные технологии в основе устойчивого развития отечественного агропромышленного комплекса. *Журнал прикладных исследований*, 2–3, 46–54. [Javadova, S.A., Molchanova, L.A. (2021). Innovative technologies at the heart of sustainable development of the domestic agro-industrial complex. *Journal of Applied Research*, 2–3, 46–54. (In Russian)] https://doi.org/10.47576/2712-7516_2021_2_3_46
13. Орлова, Н. В., Серова, Е. В., Николаев Д. В., Хворостяная, А. С., Новикова Ю. А., Явкина, Е.В. и др. (2020). Инновационное развитие агропромышленного комплекса в России. Agriculture 4.0. М.: Изд. дом Высшей школы экономики, 2020. [Orlova, N. V., Serova, E. V., Nikolaev, D. V., Khvorostyannaya, A. S., Novikova, Yu. A., Yavkina, E. V. et al. (2020). Innovation development of the agricultural complex in Russia. Agriculture 4.0. Moscow: Higher School of Economics, 2020. (In Russian)]
14. Перец, В. Ю. (2024). Инновации и их влияние на финансовую устойчивость компаний: внутренние и внешние аспекты. *Инновации и инвестиции*, 11, 38–41. [Perets, V. Yu. (2024). Innovations and their impact on the financial stability of companies: Internal and external aspects. *Innovation and Investment*, 11, 38–41. (In Russian)]
15. Гусев, Ю. В., Снакин, В. В., Шацило, Г.А. (2024). Управление инновационным развитием предприятий на основе стратегии интеграции. *Инновации и инвестиции*, 11, 12–15. [Gusev, Yu.V., Snakin, V.V., Shatsilo, G.A. (2024). Management of innovative development of enterprises based on the integration strategy. *Innovation and Investment,* 11, 12–15. (In Russian)]
16. Vignieri, V. (2021). Crowdsourcing as a mode of open innovation: Exploring drivers of success of a multisided platform through system dynamics modelling. *Systems Research and Behavioral Science*, 38(1), 108–124. https://doi.org/10.1002/sres.2636
17. Rianmora, S., Werawatganon, S. (2021). Applying quality function deployment in open innovation engineering. *Journal of Open Innovation Technology Market and Complexity*, 7(1), Article 26. https://doi.org/10.3390/joitmc7010026
18. Gajdzik, B., Siwiec, D., Wolniak, R., Pacana, A. (2024). Approaching open innovation in customization frameworks for product prototypes with emphasis on quality and life cycle assessment (QLCA). *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*, 10(2), Article 100268. https://doi.org/10.1016/j.joitmc.2024.100268
19. Williamsson, J., Sandoff, A. (2023). Holding hands on the platform: Exploring the influence of municipal open innovation platforms on sustainable business model innovation. *Cities*, 140, Article 104455. https://doi.org/10.1016/j.cities.2023.104455

20. Piot-Lepetit, I. (2023). Digitainability and open innovation: How they change innovation processes and strategies in the agrifood sector? *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 7, Article 1267346. https://doi.org/10.3389/fsufs.2023.1267346
21. Alawamleh, M., Al-Hussaini, M., Bani Ismail, L. (2022). Open innovation in the food industry: Trends and barriers — a case of the Jordanian food industry. *Journal of Global Entrepreneurship Research*, 12, 279–290. https://doi.org/10.1007/s40497-022-00312-6
22. Carrasco-Carvajal, O., García-P´erez-de-Lema, D., Castillo-Vergara, M. (2023). Impact of innovation strategy, absorptive capacity, and open innovation on SME performance: A Chilean case study. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*, 9(2), Article 100065. https://doi.org/10.1016/j.joitmc.2023.100065
23. Allal-Chérif, O., Costa Climent, J., Ulrich Berenguer, K.J. (2023). Born to be sustainable: How to combine strategic disruption, open innovation, and process digitization to create a sustainable business. *Journal of Business Research*, 154(4), Article 113379. https://doi.org/10.1016/j. jbusres.2022.113379
24. Cirule, I., Uvarova, I. (2022). Open innovation and determinants of technology-driven sustainable value creation in incubated start-ups. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*, 8(3), Article 162. https://doi.org/10.3390/joitmc8030162
25. Kemp, R. (2010). Eco-innovation: Definition, measurement and open research issues. *Economia Politica*, 27(3), 397–420. https://doi.org/10.1428/33131
26. Kiseleva, O. N., Sysoeva, O. V., Vasina, A. V., Sysoev, V. V. (2022). Updating the open innovation concept based on ecosystem approach: Regional aspects. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*, 8, Article 103. https://doi.org/10.3390/joitmc8020103
27. Farooq, U., Al-Gamrh, B., Dai, J. (2024). Green drives greenbacks: The impact of sustainable innovation on corporate cash holdings in BRICS nations. *Journal of Cleaner Production*, 436(1), Article 140533. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.140533
28. Дмитриев, Н. Д., Рогозина, Е. А. (2020). Применение инновационных технологий на пищевых предприятиях. *Вестник университета*, 7, 36–44. [Dmitriev, N.D., Rogozina, E.A. (2020). Application of innovative technologies at food enterprises. *Vestnik Universiteta*, 7, 36–44. (In Russian)] https://doi.org/10.26425/1816-4277-2020-7-36-44
29. Соболевская, А. И., Трейман, М. Г. (2024). Внедрение управленческих инноваций в деятельность современной компании. *Инновации и инвестиции*, 11, 58–60. [Sobolevska, Ya A. I., Treyman, M.G. (2024). Introduction of managerial innovations in modern company's activities. *Innovation and Investment,* 11, 58–60. (In Russian)]
30. Мамедова, С. С. (29–30 июня, 2021). *Инновационные технологии в пищевой промышленности.* Сборник научных статей VI международной научной конференции «Приоритетные направления инновационной деятельности в промышленности». Казань, 2021. [Mamedova, S.S. (June 29–30, 2021). *Innovation technologies in food industry*. Collection of the scientific articles of the VI International Scientific Conference "Priority areas of innovative activities in the industry. Kazan, 2021. (In Russian)]
31. Попова, Л. В., Дугина, Т. А., Мелихова, Л. А., Тажбенова, Г. Д. (24–25 марта, 2022). *Инновационное развитие АПК как фактор обеспечения продовольственной безопасности России.* Сборник статей международной научно-практической конференции «От модернизации к опережающему развитию: обеспечение конкурентоспособности и научного лидерства АПК. Актуальные вопросы экономики и менеджмента в АПК». Екатеринбург, 2022. [Popova, L. V., Dugina, T. A., Melikhova, L. A., Nazhbenova, G. D. (March 24–25, 2022). Innovation development of the agro-industrial complex as a factor in ensuring food security in Russia. Collection of the articles of the International Scientific and Practical Conference "From modernization to advanced development: ensuring competitiveness and scientific leadership of the agro-industrial complex. Relevant issues of economics and management in the agro-industrial complex". Ekaterinburg, 2022. (In Russian)]
32. Kociszewski, K. (2018). Sustainable development of agriculture — theoretical aspects and their implications. *Economic and Environmental Studies*, 18(3(47)), 1119–1134. https://doi.org/10.25167/ees.2018.47.5
33. Semin, A., Betin, O., Namyatova, L., Kireeva, E., Vatutina, L., Vorontcov, A. et al. (2021). Sustainable condition of the agricultural sector's environmental, economic, and social components from the perspective of open innovation. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*, 7(1), Article 74. https:// doi.org/10.3390/joitmc7010074
34. Şimşek, E. K., Kara, M., Kalıpçı, M. B., Eren, R. (2024). Sustainability and the food industry: A bibliometric analysis. *Sustainability*, 16(7), Article 3070. https://doi.org/10.3390/su16073070
35. de Bakker, E., Dagevos, H. (2012). Reducing meat consumption in today's consumer society: Questioning the citizen-consumer gap. *Journal of Agricultural and Environmental Ethics*, 25(6), 877–894. https://doi.org/10.1007/s10806-011-9345-z
36. Del Rio Castro, G., Gonzalez Fernandez, M. C., Uruburu, C. A. (2021). Unleashing the convergence amid digitalization and sustainability towards pursuing the sustainable development goals (SDGs): A holistic review. *Journal of Cleaner Production*, 280(29), Article 122204. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122204
37. Наседкина, Т. И., Черных, А. И. (2023). Перспективы развития инновационной деятельности предприятий аграрной сферы. *Инновации и инвестиции*, 10, 33–37. [Nasedkina, T. I., Chernykh, A. I. (2023). Prospects for the development of innovative activities of agricultural enterprises. *Innovation and Investment,* 10, 33–37. (In Russian)]
38. Castillo-Vergara, M., Quispe-Fuentes, I., Poblete, J. (2021). Technological innovation in the food industry: A bibliometric analysis. *Engineering Economics*, 32(3), 197–209. https://doi.org/10.5755/j01.ee.32.3.26000
39. Siegrist, M., Hartmann, C. (2020). Consumer acceptance of novel food technologies. *Nature Food*, 1(6), 343–350. https://doi.org/10.1038/s43016-020-0094-x
40. Bigliardi, B., Ferraro, G., Filippelli, S., Galati, F. (2020). Innovation models in food industry: A review of the literature: Innovation models in food industry. *Journal of Technology Management and Innovation*, 15(3), 97–108. https://doi.org/10.4067/S0718-27242020000300097
41. Соколова, А. П., Сухарева, О. А. (2024). Инновационные технологии как драйвер развития аграрных предприятий России. *Вестник Академии знаний*, 3(62), 390–396. [Sokolova, A. P., Sukhareva, O. A. (2024). Innovative potential of agricultural enterprises in Russia. *Herald of the Academy of Knowledge*, 3(62), 390–396. (In Russian)]
42. Lange, J., Wyser, Y. (2003). Recent innovations in barrier technologies for plastic packaging — a review. *Packaging Technology and Science*, 16(4), 149–158. https://doi.org/10.1002/pts.621
43. Вертий, М. В., Белова, Л. А. (18 апреля, 2019). *Инновационный вектор развития реального сектора экономики региона.* Экономическая безопасность России: современное состояние и перспективы обеспечения: материалы национальной научно-практической конференции. Краснодар, 2019. [Vertiy, M. V., Belova, L. A. (April 19, 2019). Innovative vector of development of real sector of the regional economy. Economic security of Russia: Current state and prospects for provision: Materials of the National Scientific and Practical Conference. Krasnodar, 2019. (In Russian)]
44. Владимиров, Н. А., Варущенко, А. А. (2023). Анализ влияния инноваций на развитие сельского хозяйства в Российской Федерации. *Инновации и инвестиции*, 11, 17–21. [Vladimirov, N. A., Varushchenko, A. A. (2023). Analysis of the impact of innovations on the development of agriculture in the Russian federation. *Innovation and Investment,* 11, 17–21. (In Russian)]
45. Соколова, А. П., Первакова, Е. О. (2023). Инновационный потенциал аграрных предприятий России. *Вестник Алтайской академии экономики и права*, 2–1, 121–128. [Sokolova, A.P., Pervakova, E.O. (2023). Innovative potential of agricultural enterprises in Russia. *Herald of Altai Academy of Economics and Law*, 2–1, 121–128. (In Russian)] https://doi.org/10.17513/vaael.2701
46. Тюпаков, К. Э., Аверина, М. В., Тюпаков, В. К., Майструк, Г. А. (2023). Государственное регулирование предпринимательства в аграрном секторе экономики региона. *Естественно-гуманитарные исследования*, 4(48), 343–348. [Tyupakov, K. E., Averina, M. V., Tyupakov, V. K., Maistruk G. A. (2023). State regulation of entrepreneurship in the agricultural sector of the regional economy. *Natural-Humanitarian Studies*, 4(48), 343–348. (In Russian)]
47. Kilimova, L., Cherkashin, M., Pykhtin, A., Kolmykova T. (June 28–30, 2021). *Managing the innovative development of the food industry*. BIO Web of Conferences 32, III International Scientific and Practical Conference "Problems and Prospects of Scientific and Innovative Support of the Agro-Industrial Complex of the Regions" 2021. Kursk, Russia, 2021. https://doi.org/10.1051/bioconf/20213203017

| СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ | AUTHOR INFORMATION |
|---|---|
| **Принадлежность к организации** | **Affiliation** |
| **Петрунина Ирина Всеволодовна** — старший научный сотрудник, Центр «Экономико-аналитических исследований и информационных технологий», Федеральный научный центр пищевых систем им. В. М. Горбатова<br>109316, Москва, ул. Талалихина, 26<br>E-mail: i.petrunina@fncps.ru<br>ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7287-3511 | **Irina V. Petrunina**, Senior Researcher, Center of Economic and Analytical Research and Information Technologies, V. M. Gorbatov Federal Research Center for Food Systems<br>26, Talalikhin str., 109316, Moscow, Russia<br>E-mail: i.petrunina@fncps.ru<br>ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7287-3511 |
| **Горбунова Наталья Анатольевна** — кандидат технических наук, ученый секретарь, Федеральный научный центр пищевых систем им. В. М. Горбатова<br>109316, Москва, ул. Талалихина, 26<br>E-mail: n.gorbunova@fncps.ru<br>ORCID: http://orcid.org/0000-0003-4249-9316 | **Nataliya A. Gorbunova**, Candidate of Technical Sciences, Scientific Secretary, V. M. Gorbatov Federal Research Center for Food Systems<br>26, Talalikhin str., 109316, Moscow, Russia<br>E-mail: n.gorbunova@fncps.ru<br>ORCID: http://orcid.org/0000-0003-4249-9316 |
| **Кузлякина Юлия Александровна** — кандидат технических наук, главный научный сотрудник, Отдел «Технического регулирования», Федеральный научный центр пищевых систем им. В. М. Горбатова<br>109316, Москва, ул. Талалихина, 26<br>E-mail: yu.kuzlyakina@fncps.ru<br>ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2152-620X<br>* автор для контактов | **Yulya A. Kuzlyakina**, Candidate of Technical Sciences, Chief Researcher, Department of Technical Regulation and Food Safety Systems, V. M. Gorbatov Federal Research Center for Food Systems<br>26, Talalikhin str., 109316, Moscow, Russia<br>e-mail: yu.kuzlyakina@fncps.ru<br>ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2152-620X<br>* corresponding author |
| **Замула Валентина Станиславовна** — кандидат технических наук, ведущий инженер, Отдел «Технического регулирования», Федеральный научный центр пищевых систем им. В. М. Горбатова<br>109316, г. Москва, ул. Талалихина, 26<br>E-mail: v.zamula@fncps.ru<br>ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1634-1486 | **Valentina S. Zamula**, Candidate of Technical Sciences, Lead Engineer, Department of Technical Regulation and Food Safety Systems, V. M. Gorbatov Federal Research Center for Food Systems<br>26, Talalikhin str., 109316, Moscow, Russia<br>e-mail: v.zamula@fncps.ru<br>ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1634-1486 |
| **Критерии авторства** | **Contribution** |
| Авторы в равных долях имеют отношение к написанию рукописи и одинаково несут ответственность за плагиат. | The authors are equally involved in writing the manuscript and are 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/10.21323/2618-9771-2025-8-3-324-334

Поступила 13.01.2025
Поступила после рецензирования 25.07.2025
Принята в печать 29.07. 2025
© Фомина Т. А., Хвостов Д. В., Минаев М. Ю., Утьянов Д. А., 2025

https://www.fsjour.com/jour
Научная статья
Open access

# РАЗРАБОТКА МУЛЬТИПЛЕКСНОЙ ПЦР ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВИДОСПЕЦИФИЧНОЙ ДНК САЙРЫ (*COLOLABIS SAIRA*) И ДАЛЬНЕВОСТОЧНОЙ САРДИНЫ, ИВАСИ (*SARDINOPS MELANOSTICTUS*)

Фомина Т. А.[1,2], Хвостов Д. В.[1]*, Минаев М. Ю.[1], Утьянов Д. А.[1]

[1] Федеральный научный центр пищевых систем им. В. М. Горбатова, Россия, Москва
[2] Национальный центр безопасности рыбной и сельскохозяйственной продукции, Россия, Москва

*КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:*
*видовой состав, идентификация рыб, ДНК, Cololabis saira, Sardinops melanostictus, ПЦР*

АННОТАЦИЯ

В статье представлены разработка и апробация метода мультиплексной полимеразной цепной реакции в реальном времени (ПЦР-РВ) для видовой идентификации консервированной продукции из сайры (*Cololabis saira*) и дальневосточной сардины (иваси) (*Sardinops melanostictus*). Методика основана на использовании системы олигонуклеотидов «Сайра-Иваси-ВКО» и направлена на решение проблемы фальсификации рыбной продукции, которая широко распространена на российском рынке. Для оценки специфичности метода была использована контрольная панель из 90 видов рыб, а также 195 образцов пищевой рыбной продукции. Метод продемонстрировал высокую чувствительность, позволяя выявлять ДНК целевых видов при содержании до 0,01% в образце. Специфичность праймеров подтверждена отсутствием амплификации ДНК неродственных видов. Проведенные эксперименты показали, что заявленные виды рыбы корректно идентифицируются в 100% случаев, а ложноотрицательные результаты отсутствуют. Результаты исследования пищевой продукции продемонстрировали несоответствия в 34% образцов консервов из сайры, из которых 21% заменены сардиной, а 6% — тихоокеанской сельдью. Разработанная методика снижает затраты на анализ за счет отсутствия зависимости от импортных реагентов и может быть внедрена в лабораториях, работающих с ГМО и видовой идентификацией. Выводы подтверждают эффективность предложенного подхода для контроля качества и предотвращения фальсификации рыбной продукции.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Статья подготовлена в рамках выполнения исследований по государственному заданию № FGUS-2025-0009 ФГБНУ «ФНЦ пищевых систем им. В. М. Горбатова» РАН.

Received 13.01.2025
Accepted in revised 25.07.2025
Accepted for publication 29.07.2025
© Fomina T. A., Khvostov D. V., Minaev M. Yu., Utyanov D. A., 2025

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

# DEVELOPMENT OF MULTIPLEX PCR FOR SPECIES-SPECIFIC DNA DETERMINATION OF SAURY (*COLOLABIS SAIRA*) AND FAR EASTERN SARDINE, IVASI (*SARDINOPS MELANOSTICTUS*)

Tatyana A. Fomina[1,2], Daniil V. Khvostov[1]*, Mihail Yu. Minaev[1]*, Dmitry A. Utyanov[1]

[1] V. M. Gorbatov Federal Research Center for Food Systems, Moscow, Russia
[2] Nation Center for Fish and Agricultural Product Safety, Moscow, Russia

*KEY WORDS:*
*species composition, fish identification, DNA, Cololabis saira, Sardinops melanostictus, PCR*

ABSTRACT

The paper presents the development and validation of a multiplex real-time polymerase chain reaction (real-time PCR) method for species identification of canned products from saury (*Cololabis saira*) and Far Eastern sardine (Ivasi) (*Sardinops melanostictus*). The method is based on the use of the oligonucleotide system «Saury-Ivasi-VKO» and is aimed at solving the problem of adulteration of fish products, which is widespread in the Russian market. To assess the specificity of the method, a control panel of 90 fish species and 195 food fish samples were used. The method demonstrated high sensitivity, allowing detection of DNA of target species at up to 0.01% in the sample. The specificity of primers was confirmed by the absence of DNA amplification of unrelated species. The conducted experiments showed that the declared fish species were correctly identified in 100% of cases, and there were no false negative results. The results of food product testing revealed nonconformities in 34% of canned saury samples, of which 21% were replaced by sardine and 6% by Pacific herring. The developed methodology reduces the cost of analysis due to the lack of dependence on imported reagents and can be implemented in laboratories working with GMOs and species identification. The conclusions confirm the effectiveness of the proposed approach for quality control and prevention of adulteration of fish products.

FUNDING: The article was published as part of the research topic No. FGUS-2025-0009 of the state assignment of the V. M. Gorbatov Federal Research Center for Food Systems of RAS.

## 1. Введение

Рыбная промышленность играет ключевую роль в обеспечении продовольственной безопасности и удовлетворении потребительского спроса на высокобелковые продукты. На российском потребительском рынке традиционно представлено большое разнообразие консервированной продукции из сайры (*Cololabis saira*) и дальневосточной сардины (иваси) (*Sardinops melanostictus*).

Тихоокеанская сайра (*Cololabis saira*) является одним из ключевых пелагических видов, имеющих высокую коммерческую значимость для рыболовной промышленности Японии, Тайваня, Российской Федерации и Южной Кореи. Она широко распространена в северной части Тихого океана, обитает в субтропических и субарктических водах. Данный вид характеризуется сравнительно коротким жизненным циклом, продолжительность которого составляет около двух лет. Размножение данного вида носит пролонгированный характер: период нереста каждой особи может быть длительным, а общий сезон размножения охватывает осенне-зимний период, иногда продлеваясь до весны или начала лета [1]. В настоящее время промысел сайры (*Cololabis*

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: **Фомина, Т. А., Хвостов, Д. В., Минаев, М. Ю., Утьянов, Д. А.** (2025). Разработка мультиплексной ПЦР для определения видоспецифичной ДНК сайры (*Cololabis saira*) и дальневосточной сардины, иваси (*Sardinops melanostictus*). *Пищевые системы*, 8(3), 324–334. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-3-324-334

FOR CITATION: **Fomina, T. A., Khvostov, D. V., Minaev, M. Yu., Utyanov, D. A.** (2025). Development of multiplex PCR for species-specific DNA determination of saury (*Cololabis saira*) and far eastern sardine, ivasi (*Sardinops melanostictus*). *Food Systems*, 8(3), 324–334. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-3-324-334

*saira*) осуществляется рыболовными флотами Японии, России, Южной Кореи, Китая, Тайваня и Вануату. Российские и японские суда преимущественно ведут добычу в пределах исключительных экономических зон (200-мильной зоны), в то время как промысловые операции других стран сосредоточены в открытых водах Тихого океана.

В последние годы наблюдается устойчивое снижение уловов тихоокеанской сайры (*Cololabis saira*) российскими рыболовецкими судами. В 2020–2021 гг. объем промысла не превышал 1 тыс. тонн за путину, а в 2022 году улов отсутствовал полностью [2]. Данное сокращение связано как с общим снижением численности популяции, так и с климато-океанографическими изменениями в северо-западной части Тихого океана. В частности, зафиксировано смещение субтропических вод, включая вторую и третью ветви Куросио, в более северные широты [3], что привело к восточному и северному сдвигу традиционных районов нагула сайры [4]. Дополнительным ограничением стала техническая неспособность большинства отечественных судов к работе в отдаленных океанических районах.

На фоне этих изменений российский флот частично переориентировался на добычу дальневосточной сардины (*Sardinops melanostictus*), массовое скопление которой с 2016 года наблюдается в водах Южных Курил. Этот вид распространен от Татарского пролива и Курильских островов до Южно-Китайского моря и характеризуется высокой экологической пластичностью. Основными экологическими детерминантами распределения сардины являются температура воды, доступность корма и условия нереста [5]. Вид проявляет выраженные сезонные миграции: зимой иваси концентрируется в Японском, Восточно-Китайском и Желтом морях, а летом перемещается в Охотское море и к восточному побережью Камчатки [6]. Дальневосточная сардина (*Sardinops melanostictus*) в силу высокой численности и широкой доступности стала одним из ключевых объектов отечественного промысла. В последние годы объемы ее вылова в России стабильно превышают добычу сайры и составляют 200–300 тыс. тонн в год. В 2020 году был установлен постсоветский рекорд — 313 тыс. тонн [7].

Замена сайры (*Cololabis saira*) на дальневосточную сардину (*Sardinops melanostictus*) может значительно снизить себестоимость продукции, что побуждает недобросовестных производителей к нарушению законодательства. В обзоре Do и Wong [8] подчеркивается, что основной движущей силой искажения маркировки морепродуктов является экономическая выгода, при этом для получения максимальной прибыли часто заменяют виды рыбы на более дешевые [8]. Такая практика не только подрывает доверие потребителей, но и создает серьезные правовые и экологические проблемы. Авторы подчеркивают необходимость совершенствования систем отслеживания и ужесточения нормативной базы для борьбы с фальсификацией [8].

В последние десятилетия наблюдается рост интереса к молекулярным методам идентификации в пищевой промышленности. Это связано с ужесточением требований к прозрачности цепочек поставок и с необходимостью быстрого подтверждения видовой принадлежности сырья [9,10]. Идентификация сайры и дальневосточной сардины (иваси) возможна только с помощью методов секвенирования специфических участков ДНК. Однако этот метод является трудозатратным, требует высокой квалификации специалистов, наличия дорогостоящего оборудования и расходных материалов. Внедрение методов секвенирования в рутинную практику российских лабораторий ограничено стоимостью реактивов и зависимостью от импортного оборудования. Альтернативой выступают методы на основе полимеразной цепной реакции в режиме реального времени (ПЦР-РВ), которые за последние 5 лет стали «золотым стандартом» в пищевой аутентификации.

Особое внимание уделяется аутентификации консервированной рыбной продукции из массовых промысловых видов, таких как сайра и сардина. В России сайра тихоокеанская (*Cololabis saira*) и сардина дальневосточная (иваси, *Sardinops melanostictus*) — популярное сырье для консервов. При этом до недавнего времени видовую принадлежность содержимого консервов можно было достоверно определять только путем секвенирования фрагментов ДНК, что, как отмечалось выше, является длительным и ресурсоемким процессом. Реализация ПЦР-диагностики в данном секторе могла бы заполнить эту нишу. Зарубежные работы демонстрируют, что даже в сильно переработанных продуктах (соленых, варено-копченых, в масле и пр.) методика ПЦР способна выделить и амплифицировать видоспецифичные фрагменты ДНК для идентификации вида [11]. Мультиплексный формат особенно удобен в случае консервов, содержащих смеси нескольких видов рыбы, — благодаря ему можно в одном анализе проверить присутствие сразу двух целевых видов (например, сайры и сардины). В целом, совокупность современных исследований показывает, что создание отечественных ПЦР-систем для идентификации сайры и иваси является актуальной задачей. Доступность технологий ПЦР, наличие оборудования в испытательных лабораториях (во многом унаследованного от практики тестирования ГМО) и успешный мировой опыт указывают на возможность быстрого внедрения этих методов для борьбы с фальсификацией рыбной продукции в России.

Следует отметить, что в 2019 г. в России была утверждена «Стратегия развития рыбоперерабатывающей отрасли до 2030 года»[1], где обозначена необходимость противодействия фальсификации рыбной продукции. Однако реализация этой задачи затруднена отсутствием стандартизированных методик экспресс-анализа. Разработка доступных и надежных методов видовой идентификации, таких как ПЦР в реальном времени, позволит устранить этот пробел и усилить контроль качества. В данной статье предлагается новый подход к идентификации сайры (*Cololabis saira*) и дальневосточной сардины (иваси, *Sardinops melanostictus*) с помощью мультиплексной ПЦР-РВ. Для этого разработана система видоспецифичных олигонуклеотидных праймеров и зондов «Сайра-Иваси-ВКО», позволяющая одновременно обнаруживать ДНК обоих целевых видов в одном анализе. Цель исследования — внедрить и валидировать данный метод, заполнив пробел в аналитических инструментах контроля и обеспечив отечественным испытательным лабораториям эффективный способ подтверждения вида рыбного сырья. Предлагаемая методика призвана повысить достоверность маркировки консервированной продукции из сайры и иваси, снизить долю фальсификата на рынке и тем самым приблизить отечественные практики контроля к лучшим мировым стандартам.

## 2. Объекты и методы

### *2.1. Объекты исследования*

Для исследования методики на специфичность была создана контрольная панель образцов, включающая образцы ДНК генетической коллекции промысловых видов рыб Национального центра безопасности рыбной и сельскохозяйственной продукции (НЦБРСП). Коллекция включает образцы ДНК 90 видов рыб из 42 семейств и хранится в испытательной референс-лаборатории НЦБРСП. Образцы коллекции используются для идентификации и аутентификации пищевой рыбной продукции с применением методов молекулярной диагностики: секвенирование по Сенгеру, секвенирование нового поколения (NGS) и методом полимеразной цепной реакции в режиме реального времени (ПЦР-РВ). Подлинность образцов коллекции установлена путем секвенирования фрагментов митохондриального гена цитохрома b (CytB) и гена 16S рибосомальной РНК (16S rRNA). Состав контрольной панели представлен в Таблице 1.

Помимо образцов контрольной панели, для валидации и апробации методики было отобрано 195 образцов пищевой рыбной продукции. Образцы разделили на несколько групп. Первая группа включала образцы сайры тихоокеанской натуральной или с добавлением

[1] Стратегия развития рыбоперерабатывающей отрасли до 2030 года. Электронный ресурс https://fish.gov.ru/wp-content/uploads/documents/files/proekt-strategiya-2030.pdf. Дата доступа 19.12.2025

Таблица 1. **Пример приготовления модельных образцов с различным содержанием сайры и иваси**

Table 1. **Example of preparation of the model samples with different content of Pacific saury and ivasi**

| Содержание целевого компонента | Компонент | |
|---|---|---|
| | Навеска фарша сайры | Навеска фарша иваси |
| 10,0 % сайры | 10,0 г 100 % сайры | 90,0 г 100 % иваси |
| 1,0 % сайры | 10,0 г 10,0 % сайры | 90,0 г 100 % иваси |
| 0,1 % сайры | 10,0 г 1,0 % сайры | 90,0 г 100 % иваси |
| 0,01 % сайры | 10,0 г 0,1 % сайры | 90,0 г 100 % иваси |
| 10,0 % иваси | 90,0 г 100 % сайры | 10,0 г 100 % иваси |
| 1,0 % иваси | 90,0 г 100 % сайры | 10,0 г 10,0 % иваси |
| 0,1 % иваси | 90,0 г 100 % сайры | 10,0 г 1,0 % иваси |
| 0,01 % иваси | 90,0 г 100 % сайры | 10,0 г 0,1 % иваси |

масла; вторая группа — образцы сардины (иваси) тихоокеанской натуральной или с добавлением масла; третья группа — образцы со смешанным составом: сайра тихоокеанская и сардина (иваси) тихоокеанская натуральные или с добавлением масла.

Всего для оценки специфичности был исследован 281 образец ДНК. Также для определения предела обнаружения метода (LOD) в объекты исследования были включены модельные образцы, содержащие разное процентное соотношение сайры и иваси. Модельные образцы были подготовлены следующим образом: рыбу разделывали на филе путем отделения мяса от костей, предварительно удалив голову и плавники, внутренности удаляли через разрез в брюшке, сгустки крови зачищали; далее для получения однородной массы проводили гомогенизацию с использованием на ножевой мельнице Grindomix GM 200 (Retsch, Хаан, Германия), после чего смешивали в различных пропорциях согласно данным Таблицы 1. Для обеспечения равномерного распределения компонентов фарш подвергали тщательному перемешиванию. Аналогичным образом были подготовлены образцы из консервированной сайры и иваси. Все образцы хранились при температуре минус 20 °C до момента проведения испытаний.

*2.2. Выделение ДНК*

Экстракцию ДНК проводили из 50 мг мышечной ткани с использованием набора реагентов «Сорб-ГМО-Б» (кат. № GM-503, ООО «Синтол», Россия). Набор предназначен для выделения ДНК из растительного материала, продуктов питания, пищевого сырья растительного и животного происхождения с использованием метода ЦТАБ и сорбентно-осаждающего метода выделения ДНК. Комбинация данных методов обеспечивает высокую эффективность выделения ДНК. Метод ЦТАБ (гомогенная экстракция с применением цетилтриметиламмоний бромида) был разработан в 1980 году Murray M. G. и Thompson W. F., в своей работе авторы показали, что метод ЦТАБ обеспечивает высокий выход тотальной ДНК растений при минимальном уровне ингибиторов за счет образования устойчивого комплекса ДНК с детергентом [12]. Позже Boom R. с соавторами предложил применять сорбционную методику, позволяющую эффективно выделять малые количества нуклеиновых кислот путем их осаждения на силикагелевых или диатомитовых частицах в присутствии тиоцианата гуанидина [13]. Такой комбинированный подход применяют и в настоящее время.

Из каждого образца получили 150 мкл экстракта, которые были соответствующим образом маркированы и хранились при температуре — 20 °C до последующего анализа.

*2.3. Подбор праймеров для ПЦР-РВ с системой олигонуклеотидов «Сайра-Иваси-ВКО»*

Для определения и идентификации ДНК сайры и иваси в качестве генетического маркера был выбран ген цитохрома b (cytb) мтДНК, который является одним из наиболее изученных митохондриальных генов и широко используемым маркером для видовой идентификации [14,15]. Для амплификации эндогенного контроля был выбран консервативный участок гена 16S рРНК мтДНК, имеющего широту определения на уровне царства животных (Animali). Подробное исследование отобранных митохондриальных ДНК-последовательностей выполняли с использованием генетической базы данных Национального центра биотехнологической информации США (National Center for Biotechnological Information, NCBI), доступной в открытом режиме в сети Интернет [16]. Оценку вариабельности и идентификацию консервативных регионов, необходимых для подбора праймеров, проводили посредством программы Primer-BLAST. Теоретическая проверка специфичности выбранных праймеров осуществлялась с применением интерактивного инструмента BLAST online [17]. Оценку структурно-термодинамических характеристик праймеров проводили с использованием веб-сервиса для определения физических свойств олигонуклеотидов OligoAnalyzer компании Integrated DNA Technologies [18]. Подобранные праймеры представлены в Таблице 2.

*2.4. Получение положительных контрольных образцов*

Для ПЦР с системой олигонуклеотидов «Сайра-Иваси-ВКО» был разработан положительный контроль (ПКО сайра-иваси-ВКО), представляющий собой генно-инженерную конструкцию — плазмидный вектор pAL2-T. Этот вектор содержит целевые фрагменты ДНК сайры, дальневосточной сардины (иваси) и животных, полученные путем амплификации генов cytb и 16S rDNA. При получении продуктов амплификации перед клонированием вставки в плазмиду идентичность последовательности нуклеотидов проверяли методом секвенирования по Сенгеру. Для создания ПКО сайра-иваси-ВКО, содержащего одновременно фрагменты мтДНК сайры, дальневосточной сардины (иваси) и внутреннего контроля, смешивали плазмиды, содержащие нуклеотидные последовательности каждой из мишеней. На основе проведенных исследований по определению чувствительности с использованием рекомбинантных плазмид в качестве рабочих были выбраны концентрации: для детекции фрагмента генома сайры — $5{,}737 \times 10^6$ коп/мкл; для детекции фрагмента генома дальневосточной сардины (иваси) — $5{,}318 \times 10^6$ коп/мкл; для детекции фрагмента генома животных — $7{,}070 \times 10^6$ коп/мкл.

*2.5. Протокол испытания*

Мультиплексную ПЦР-РВ с системой олигонуклеотидов «Сайра-Иваси-ВКО» проводили на амплификаторах Rotor-Gene 6000 (Corbett Research, Австралия), CFX 96 Touch Deep Well (BioRad, США) и QuantStudio 5 (Life Technologies Holdings Pte Ltd, Сингапур) с использованием набора реагентов для ПЦР-РВ (кат. № М-428, ООО «Синтол», Россия). Реакционная смесь объемом 30 мкл содержала 10 мкл 2,5× мастер-микса (включающего 2,5× ПЦР-буфер Б, SynTaq ДНК-полимеразу, дезоксинуклеозидтрифосфаты, глицерол и Tween 20), 9 мкл смеси праймеров, 9 мкл нуклеазной воды и 2 мкл выделенной ДНК.

Термоциклирование выполняли по следующему протоколу: начальная денатурация при температуре 95 °C в течение 420 секунд, затем 35 циклов амплификации, состоящих из денатурации при 95 °C (15 секунд) и отжига/элонгации при 60 °C (40 секунд). Флуоресцентную детекцию осуществляли по трем каналам: FAM/Green (сайра), ROX/Orange (иваси) и Cy5/Red (внутренний контроль).

## 3. Результаты и обсуждение

В ходе экспериментальной валидации специфичности ПЦР-РВ с применением системы олигонуклеотидов «Сайра-Иваси-ВКО» была проведена амплификация ДНК из различных образцов рыбной продукции. Все исследуемые образцы, видовая принадлежность которых ранее была идентифицирована как сайра (*Cololabis saira*) и дальневосточная сардина (*Sardinops melanostictus*), продемонстрировали воспроизводимый положительный сигнал амплификации в соответствующих каналах детекции флуоресценции.

Дополнительно была проведена серия анализов с использованием контрольной панели ДНК, включающей широкий спектр промысловых видов рыб, млекопитающих и птиц, а также растительных компонентов. В результате амплификация специфических мишеней (сайры и иваси) была зафиксирована исключительно в целевых

Таблица 2. **Дизайн праймеров для ПЦР-РВ с системой олигонуклеотидов «Сайра-Иваси-ВКО»**
Table 2. **Design of primers for real-time PCR with the oligonucleotide system «Saury-Ivasi-VKO»**

| Праймер | Наименование | Последовательность 5'-3' | Длина |
|---|---|---|---|
| | | ***Cololabis saira*** | |
| Прямой | Saira-F | AGTACAATGAATTTGGGGAGGTTTT | 25 |
| Обратный | Saira-R | TGGAGAAAAATAAGGTGGATTAGGG | 25 |
| Зонд | Saira-T | FAM–CGCAACTCTCACCCGGTTCTTCGCATTCC-RTQ1 | 29 |
| | | ***Sardinops melanostictus*** | |
| Прямой | Sard.mel-F | GAAACTTTGGCTCACTCCTGGG | 22 |
| Обратный | Sard.mel-R | TAACATCACGGCAAATATGGGCG | 23 |
| Зонд | Sard.mel-T | ROX–CTATGTTTAGCAGCACAGATTTTGACAGGACTATTCC- RTQ2 | 37 |
| | | ***Царство Animalia*** | |
| Прямой | 16S All UNI-101F | CCTAGGGATAACAGCGCAATCC | 22 |
| Обратный | 16S All UNI-101R | AAYAGCGGCTGCACCATTAG | 20 |
| Зонд | 16S All UNI-101T | Cy5-TTACGACCTCGATGTTGGATCAGGACAT-BHQ2 | 28 |

образцах, тогда как во всех остальных тестируемых образцах специфический флуоресцентный сигнал отсутствовал, что подтверждает отсутствие неспецифического связывания праймеров и высокую специфичность предложенной методики.

Графическое представление результатов амплификации показано на Рисунке 1, где отражена динамика накопления флуоресцентного сигнала при амплификации ДНК сайры и дальневосточной сардины (иваси) на амплификаторе CFX96. Эти результаты подтверждают высокую чувствительность и специфичность метода, позволяя использовать предложенный подход для достоверной идентификации видового состава рыбной продукции, включая контроль за возможной фальсификацией сырья.

Проведенное исследование экспериментальным путем показало, что в образцах сайры специфическая реакция амплификации присутствовала на канале детекции FAM/Green, Cy5/Red и одновременно отсутствовала на канале ROX/Orange. Это говорит о наличии специфического фрагмента ДНК сайры в исследуемых образцах, о прохождении ВКО и об отсутствии ингибирования. В образцах иваси специфическая реакция присутствовала на канале ROX/Orange, Cy5/Red и одновременно отсутствовала на канале FAM/Green, свидетельствуя о наличии специфического фрагмента ДНК дальневосточной сардины (иваси) в исследуемых образцах, о прохождении ВКО и об отсутствии ингибирования.

ДНК сайры и дальневосточной сардины (иваси) была идентифицирована в 100 % случаях, ложноотрицательные результаты отсутствовали.

В Таблице 3 представлены результаты оценки специфичности с использованием контрольной панели ДНК различных видов промысловых рыб, млекопитающих, птиц и растений.

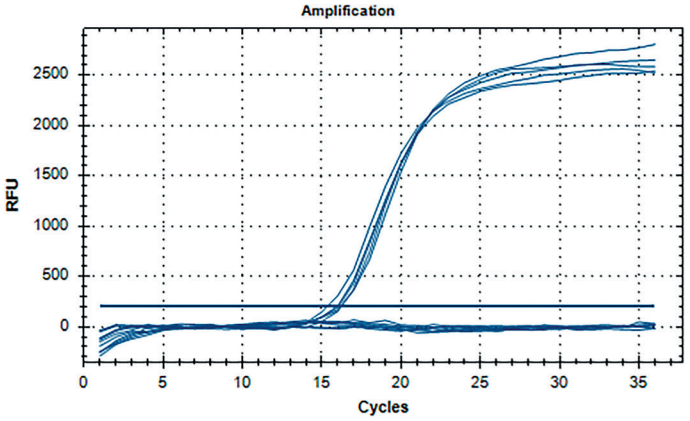
Для оценки чувствительности праймеров и определения предела обнаружения (LOD) системы олигонуклеотидов «Сайра-Иваси-ВКО» была проведена серия экспериментов с десятикратными последовательными разведениями (от $10^{-1}$ до $10^{-6}$) исходной ДНК сайры (*Cololabis saira*) и дальневосточной сардины (*Sardinops melanostictus*). Каждое разведение анализировали в трех повторностях, используя стандартный протокол амплификации.

Эксперименты проводили на амплификаторе Rotor-Gene с флуоресцентной детекцией в каналах FAM/Green (ДНК сайры), ROX/Orange (ДНК иваси) и Cy5/Red (внутренний контроль, ДНК Animalia). Постепенное снижение концентрации целевой ДНК сопровождалось ожидаемым увеличением порогового цикла (Ct), вплоть до предельного значения, при котором амплификация оставалась воспроизводимой.

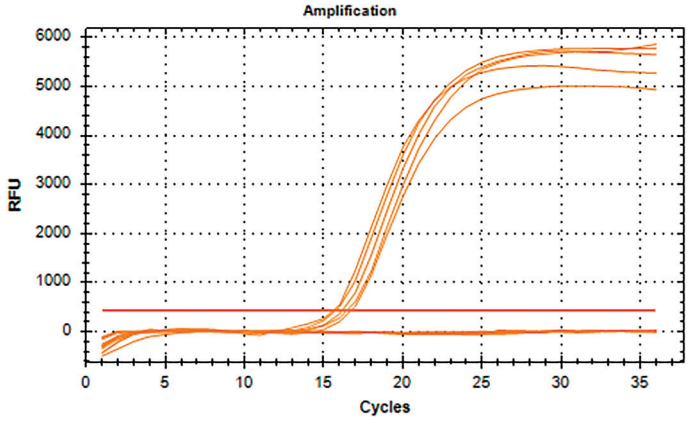
Результаты эксперимента, представленные на Рисунке 2 и в Таблице 4, показали, что предельное разведение, при котором ДНК целевых видов рыб могла быть надежно детектирована, составляет $1{\times}10^{-4}$. При дальнейшем снижении концентрации специфический амплификационный сигнал не регистрировался, что подтверждает высокую чувствительность метода. Эти данные свидетельствуют о возможности применения разработанной методики для детекции минимальных количеств ДНК в сложных многокомпонентных матрицах, таких как переработанная рыбная продукция, обеспечивая эффективный контроль ее видового состава и выявление возможной фальсификации.

Далее были проведены измерения концентрации ДНК в разведении $1 \times 10^{-1}$ методом флуориметрии на флуориметре Qubit 4 (Thermo Fisher Scientific) с использованием набора Qubit BR для количественного определения двунитевой ДНК с диапазоном измерения 2–1000 нг. Было установлено, что чувствительность ПЦР с системой олигонуклеотидов «Сайра-Иваси-ВКО» составляет: для сайры — 5,7 пкг/мкл, или 11,4 пкг/реак, или 0,01 % сайры относительно общего содержания рыбы; для иваси — 4,4 пкг/мкл, или 8,8 пкг/реак, или 0,01 % иваси относительно общего содержания рыбы.

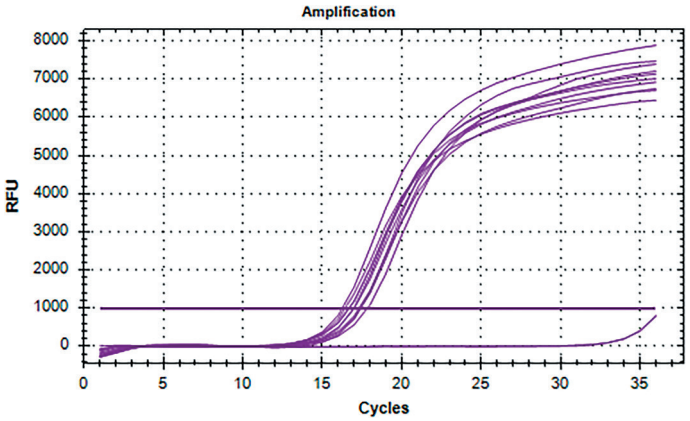
Для оценки эффективности амплификации проанализирована зависимость порогового цикла (Ct) от логарифма концентрации ДНК. Эффективность рассчитывали по уравнению: $E = [10^{(-1/\text{slope})}] - 1$, где slope — наклон логарифмической зависимости Ct от концентрации матрицы. При идеальных условиях (100 % эффективность амплификации) slope = — 3,32. В ходе серии десятикратных разведений (от $10^{-1}$ до $10^{-6}$) с использованием приборов CFX 96, QuantStudio 5 и Rotor-Gene




Детекция флуоресценции по каналу FAM/Green, определение наличия ДНК сайры




Детекция флуоресценции по каналу ROX/Orange, определение наличия ДНК иваси




Детекция флуоресценции по каналу Cy5/Red, определение наличия ВКО (ДНК Animalia)

Рисунок 1. **Результаты накопления флуоресцентного сигнала амплификации ДНК образцов сайры и иваси. Детекция флуоресценции по каналу FAM/Green (ДНК сайры), ROX/Orange (ДНК иваси), Cy5/Red (ДНК ВКО)**

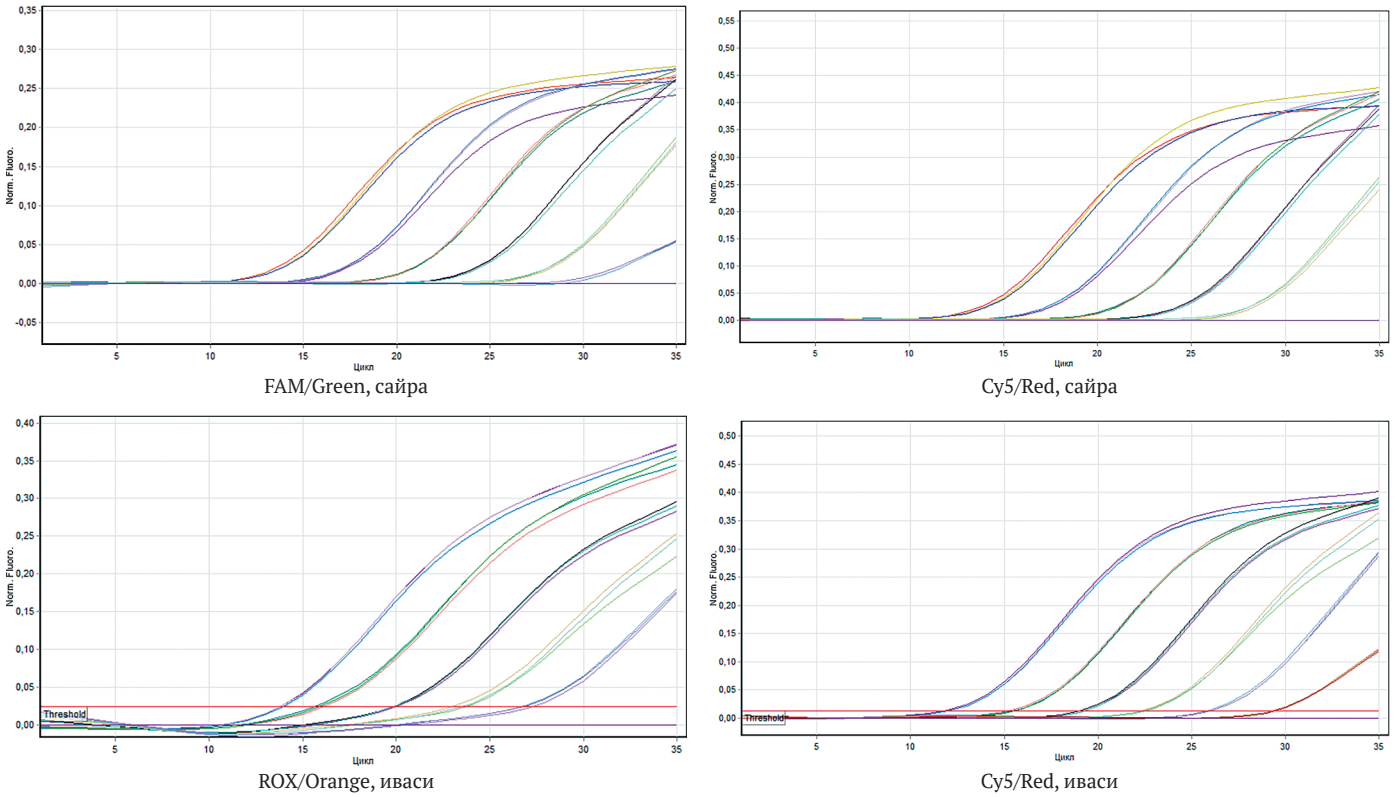
Figure 1. **Results of accumulation of the fluorescent signal of DNA amplification of the samples of Pacific saury and ivasi. Detection of fluorescence in the channels FAM/Green (DNA of Pacific saury), ROX/Orange (DNA of ivasi), Cy5/Red (VKO DNA)**

Таблица 3. **Результат исследования специфичности ПЦР с системой олигонуклеотидов «Сайра-Иваси-ВКО»**

Table 3. **Results of testing the specificity of PCR with the oligonucleotide system «Saury-Ivasi-VKO»**

| № п/п | ДНК промысловых видов рыб, млекопитающих и растений | Результат амплификации по каналам: | | |
|---|---|---|---|---|
| | | FAM/Green, определение наличия ДНК сайры | ROX/Orange, определение наличия ДНК иваси | Cy5/Red, определение наличия ВКО (ДНК Animalia) |
| 1. | Сайра (*Cololabis saira*) | + | – | + |
| 2. | Иваси (*Sardinops melanostictus*) | – | + | + |
| 3. | Атлантическая сельдь (*Clupea harengus*) | – | – | + |
| 4. | Тихоокеанская сельдь (*Clupea pallasii*) | – | – | + |
| 5. | Салака (*Clupea harengus membras*) | – | – | + |
| 6. | Европейский шпрот (*Sprattus sprattus*) | – | – | + |
| 7. | Черноморско-каспийская тюлька (*Clupeonella cultriventris*) | – | – | + |
| 8. | Европейская сардина (*Sardina pilchardus*) | – | – | + |
| 9. | Атлантическая скумбрия (*Scomber scombrus*) | – | – | + |
| 10. | Японская скумбрия (*Scomber japonicus*) | – | – | + |
| 11. | Длиннохвостый тунец (*Thunnus tonggol*) | – | – | + |
| 12. | Восточная пеламида (*Sarda orientalis*) | – | – | + |
| 13. | Желтоперый тунец (*Thunnus albacares*) | – | – | + |
| 14. | Макрелевый тунец (*Auxis thazard*) | – | – | + |
| 15. | Обыкновенный тунец (*Thunnus thynnus*) | – | – | + |
| 16. | Атлантическая треска *(Gadus morhua)* | – | – | + |
| 17. | Тихоокеанская треска *(Gadus macrocephalus)* | – | – | + |
| 18. | Дальневосточная навага *(Eleginus gracilis)* | – | – | + |
| 19. | Минтай *(Gadus chalcogrammus)* | – | – | + |
| 20. | Налим *(Lota lota)* | – | – | + |
| 21. | Сайда (*Pollachius virens)* | – | – | + |
| 22. | Пикша *(Melanogrammus aeglefinus)* | – | – | + |
| 23. | Северная путассу *(Micromesistius poutassou)* | – | – | + |
| 24. | Атлантический лосось *(Salmo salar)* | – | – | + |
| 25. | Горбуша *(Oncorhynchus gorbuscha)* | – | – | + |
| 26. | Кета *(Oncorhynchus keta)* | – | – | + |
| 27. | Кижуч *(Oncorhynchus kisutch)* | – | – | + |
| 28. | Радужная форель *(Oncorhynchus mykiss)* | – | – | + |
| 29. | Белорыбица (нельма) *(Stenodus leucichthys)* | – | – | + |
| 30. | Нерка *(Oncorhynchus nerka)* | – | – | + |
| 31. | Сибирская ряпушка *(Coregonus sardinella)* | – | – | + |
| 32. | Зубан *(Dentex)* (род) | – | – | + |
| 33. | Лобастый зубан, зубан-философ *(Dentex gibbosus)* | – | – | + |
| 34. | Золотистый пагр *(Pagrus pagrus)* | – | – | + |
| 35. | Красный пагель *(Pagellus erythrinus)* | – | – | + |
| 36. | Золотистый спар (дорада) *(Sparus aurata)* | – | – | + |
| 37. | Серебряный карась *(Carassius gibelio)* | – | – | + |
| 38. | Плотва обыкновенная *(Rutilus rutilus)* | – | – | + |
| 39. | Толстолобики *(Hypophthalmichthys)* (род) | – | – | + |
| 40. | Сазан (*Cyprinus carpio)* | – | – | + |
| 41. | Пестрый толстолобик *(Hypophthalmichthys nobilis)* | – | – | + |
| 42. | Лещ *(Abramis brama)* | – | – | + |
| 43. | Американский речной угорь *(Anguilla rostrata)* | – | – | + |
| 44. | Обыкновенный речной угорь *(Anguilla anguilla)* | – | – | + |
| 45. | Японский речной угорь *(Anguilla japonica)* | – | – | + |
| 46. | Баррамунди *(Lates calcarifer)* | – | – | + |
| 47. | Малабарский групер *(Epinephelus malabaricus)* | – | – | + |
| 48. | Малабарский групер *(Epinephelus malabaricus)* | – | – | + |
| 49. | Меагр *(Argyrosomus regius)* | – | – | + |
| 50. | Обыкновенный лаврак (сибас) *(Dicentrarchus labrax)* | – | – | + |
| 51. | Желтохвост (*Seriola quinqueradiata)* | – | – | + |
| 52. | Желтополосый селар *(Selaroides leptolepis)* | – | – | + |
| 53. | Помфрет (*Parastromateus niger)* | – | – | + |
| 54. | Индийская зубатая барабуля *(Parupeneus indicus)* | – | – | + |
| 55. | Пангасиус *(Pangasianodon hypophthalmus)* | – | – | + |
| 56. | Европейский анчоус *(Engraulis encrasicolus)* | – | – | + |
| 57. | Буканерский анчоус (*Encrasicholina punctifer)* | – | – | + |
| 58. | Перуанский анчоус *(Engraulis ringens)* | – | – | + |
| 59. | Обыкновенный сом *(Silurus glanis)* | – | – | + |
| 60. | Африканский клариевый сом *(Clarias gariepinus)* | – | – | + |
| 61. | Мойва *(Mallotus villosus)* | – | – | + |
| 62. | Морская малоротая корюшка *(Hypomesus japonicus)* | – | – | + |
| 63. | Белуга *(Huso huso)* | – | – | + |
| 64. | Тюрбо, или большой ромб *(Scophthalmus maximus)* | – | – | + |
| 65. | Нильская тиляпия (*Oreochromis niloticus)* | – | – | + |
| 66. | Эсколар *(Lepidocybium flavobrunneum)* | – | – | + |
| 67. | Рувета *(Ruvettus pretiosus)* | – | – | + |
| 68. | Американский стрелозубый палтус *(Atheresthes stomias)* | – | – | + |
| 69. | Остроголовые камбалы *(Cleisthenes) (род)* | – | – | + |
| 70. | Тихоокеанский белокорый палтус (*Hippoglossus stenolepis)* | – | – | + |
| 71. | Черный палтус *(Reinhardtius hippoglossoides)* | – | – | + |
| 72. | Двухлинейная камбала *(Lepidopsetta bilineata)* | – | – | + |
| 73. | Синяя зубатка *(Anarhichas denticulatus)* | – | – | + |
| 74. | Макрурус *(Macrouridae)* (семейство) | – | – | + |
| 75. | Липарисы *(Liparis)* | – | – | + |
| 76. | Мерлузы *(Merluccius)* (род) | – | – | + |
| 77. | Марлин *(Makaira)* (род) | – | – | + |
| 78. | Полосатый копьеносец *(Kajikia audax)* | – | – | + |
| 79. | Пятнистая мена *(Mene maculata)* | – | – | + |
| 80. | Обыкновенная рыба-сабля *(Trichiurus lepturus)* | – | – | + |
| 81. | Бычок-песочник, или речной бычок *(Neogobius fluviatilis)* | – | – | + |
| 82. | Азиатский паралихт *(Paralichthys olivaceus)* | – | – | + |
| 83. | Лемонема *(Laemonema longipes)* | – | – | + |
| 84. | Обыкновенная ледяная рыба *(Champsocephalus gunnari)* | – | – | + |
| 85. | Конгрио *(Genypterus)* (род) | – | – | + |
| 86. | Щука или обыкновенная щука *(Esox lucius)* | – | – | + |
| 87. | Амурская щука (*Esox reicherti)* | – | – | + |
| 88. | Малозубый большеглазый пентапод *(Gymnocranius microdon)* | – | – | + |
| 89. | Обыкновенный судак (*Sander lucioperca)* | – | – | + |
| 90. | Морские окуни (*Sebastes)* (род) | – | – | + |
| 91. | Гусь (*Anser*) (род) | – | – | + |
| 92. | Утенок (*Anas*) (род) | – | – | + |
| 93. | Кролик (*Oryctolagus cuniculus*) | – | – | + |
| 94. | Рис (*Oryza*) | – | – | – |
| 95. | Овес (*Avena*) | – | – | – |
| 96. | Пшеница (*Triticum*) | – | – | – |
| 97. | Гречиха (*Fagopyrum*) | – | – | – |
| 98. | Кукуруза (*Zea mays*) | – | – | – |

*Примечание*: «+» — наличие специфической реакции, целевая ДНК обнаружена; «–» — отсутствие специфической реакции, целевая ДНК отсутствует.




FAM/Green, сайра | Cy5/Red, сайра

ROX/Orange, иваси | Cy5/Red, иваси

Рисунок 2. **Оценка чувствительности амплификации. Детекция флуоресценции при амплификации разведений исходной ДНК сайры и иваси. По каналу FAM/Green детектируется ДНК сайры, по каналу ROX/Orange — ДНК иваси, по каналу Cy5/Red — ДНК (Царство *Animalia*)**

Figure 2. **Assessment of the sensitivity of amplification. Detection of fluorescence upon amplification of dilutions of the initial DNA of Pacific saury and ivasi. DNA of Pacific saury was detected in the channel FAM/Green, DNA of ivasi in the channel ROX/Orange, VKO DNA (Kingdom *Animalia*) in the channel Cy5/Red**

Таблица 4. **Оценка чувствительности амплификации. Результаты амплификации разведений исходной ДНК сайры и иваси**

Table 4. **Assessment of the sensitivity of amplification. Results of amplification of dilutions of the initial DNA of Pacific saury and ivasi**

| Наименование образца | Результат ПЦР по каналу, Ct средняя | | | Результат* |
|---|---|---|---|---|
| | FAM/Green ДНК сайры | ROX/Orange ДНК иваси | Cy5/Red ДНК ВКО | |
| Сайра | 12,11 | — | 13,49 | + |
| Сайра $10^{-1}$ | 15,59 | — | 16,73 | + |
| Сайра $10^{-2}$ | 19,36 | — | 20,48 | + |
| Сайра $10^{-3}$ | 22,68 | — | 23,71 | + |
| Сайра $10^{-4}$ | 26,57 | — | 27,58 | + |
| Сайра $10^{-5}$ | — | — | — | – |
| Сайра $10^{-6}$ | — | — | — | – |
| Иваси | — | 13,80 | 13,72 | + |
| Иваси $10^{-1}$ | — | 15,89 | 17,06 | + |
| Иваси $10^{-2}$ | — | 19,79 | 20,53 | + |
| Иваси $10^{-3}$ | — | 23,50 | 23,97 | + |
| Иваси $10^{-4}$ | — | 26,73 | 27,33 | + |
| Иваси $10^{-5}$ | — | — | — | – |
| Иваси $10^{-6}$ | — | — | — | – |

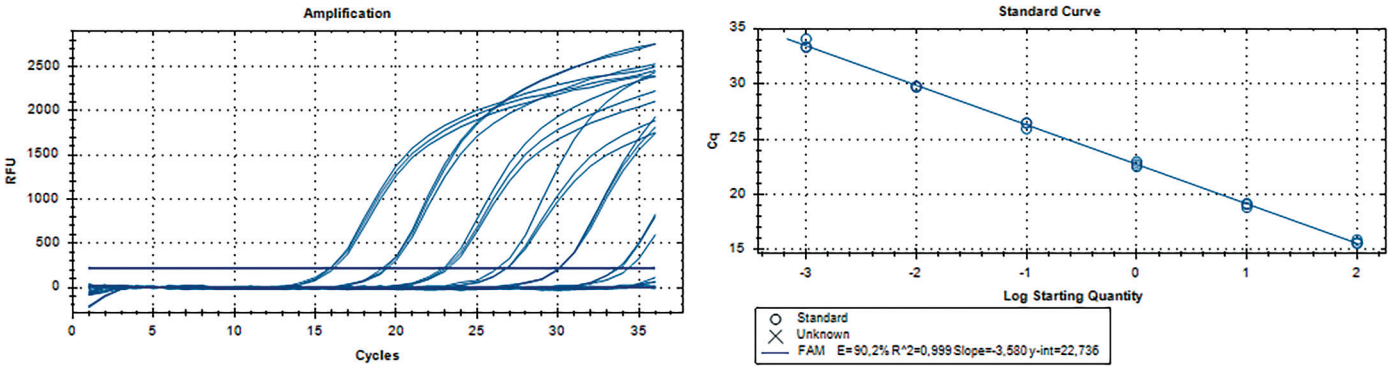
* *Примечание*: «+» — наличие специфической реакции, целевая ДНК обнаружена; «–» — отсутствие специфической реакции, целевая ДНК отсутствует.

6000 установлено, что эффективность амплификации ДНК сайры составляет 89–91,5%, ДНК дальневосточной сардины (иваси) — 93,6–99%, а внутреннего контроля (ДНК животных) — 92–98,6% в зависимости от прибора. Результаты, полученные на приборе CFX 96, представлены на Рисунке 3. Эти показатели демонстрируют высокий уровень эффективности амплификации, что подтверждает надежность методики при анализе различных образцов рыбной продукции.

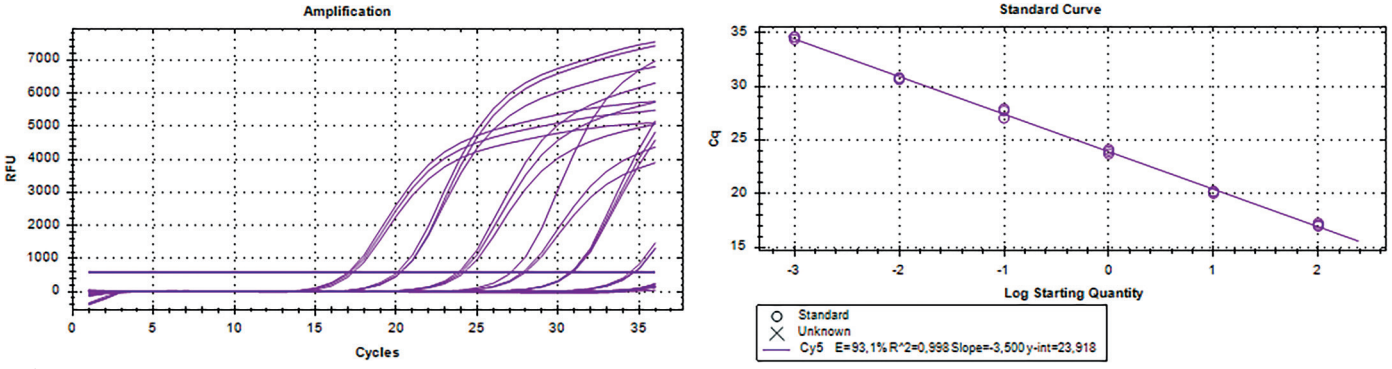
При анализе предела обнаружения (LOD) установлено, что метод позволяет выявлять целевую ДНК сайры и дальневосточной сардины (иваси) в концентрациях до 0,01% (Таблица 5), что соответствует или превосходит показатели, заявленные в других исследованиях.

Исследование пищевой рыбной продукции РВ с системой олигонуклеотидов «Сайра-Иваси-ВКО» показало, что несоответствия по видовому составу были выявлены в консервах «Сайра тихоокеанская» и «Сайра тихоокеанская и сардина (иваси) тихоокеанская», из 155 исследованных образцов соответствовали заявленному составу 107, что составляет 69% (Таблица 6). Чаще всего в продукции отсутствовала заявленная производителем сайра, вместо нее была обнаружена дальневосточная сардина (иваси) и тихоокеанская сельдь, а также присутствовал подмес дальневосточной сардины (иваси) к сайре. В образцах консервов «Сардина (иваси) тихоокеанская» несоответствий по заявленному составу выявлено не было.

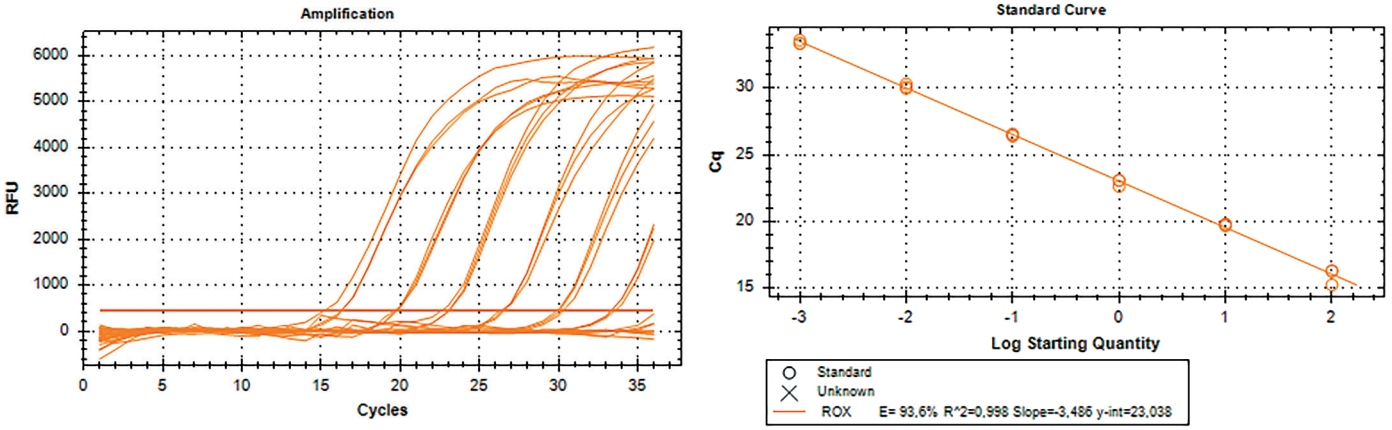
Международное сообщество активно разрабатывает меры противодействия фальсификации пищевых продуктов. В 2020 году ВОЗ подчеркнула необходимость усиления национальных систем контроля качества пищевой продукции для предотвращения и выявления угроз общественному здоровью. В рамках этой инициативы ВОЗ поддерживает государства-члены в реализации Глобальной стратегии по безопасности пищевых продуктов на 2022–2030 годы, направленной на снижение заболеваемости, связанной с пищевыми инфекциями [19].



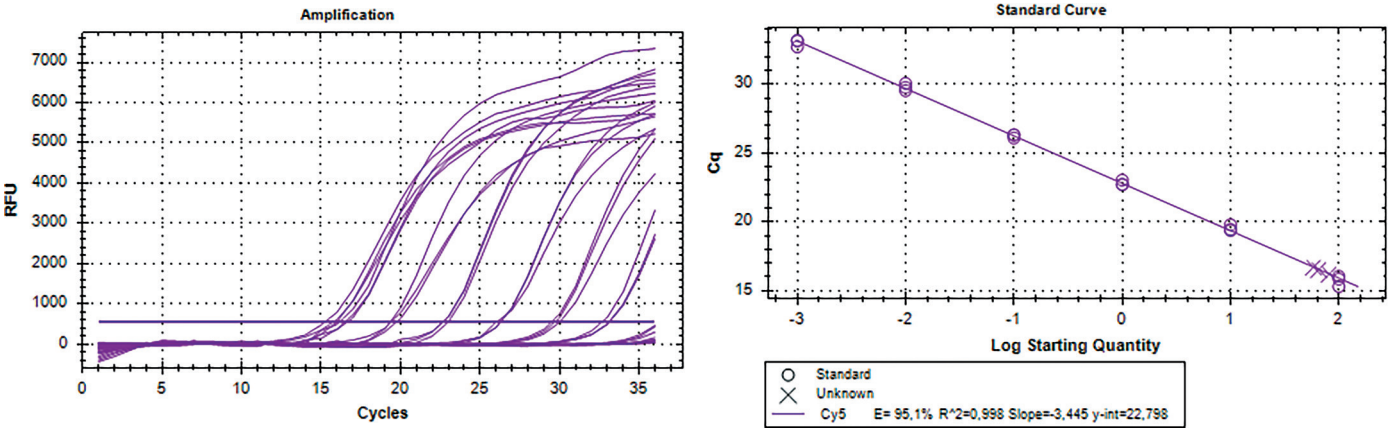

FAM/Green, сайра




Cy5/Red, сайра




ROX/Orange, иваси




Cy5/Red, иваси

Рисунок 3. **Оценка эффективности амплификации. Детекция флуоресценции при амплификации разведений исходной ДНК сайры и иваси. По каналу FAM/Green детектируется ДНК сайры, по каналу ROX/Orange — ДНК иваси, по каналу Cy5/Red — ДНК (Царство *Animalia*)**

Figure 3. **Assessment of amplification efficiency. Detection of fluorescence upon amplification of dilutions of the initial DNA of Pacific saury and ivasi. DNA of Pacific saury was detected in the channel FAM/Green, DNA of ivasi in the channel ROX/Orange, VKO DNA (Kingdom *Animalia*) in the channel Cy5/Red**

Таблица 5. **Установление предела обнаружения ПЦР с системой олигонуклеотидов «Сайра-Иваси-ВКО»**
Table 5. **Determination of the limit of detection of PCR with the oligonucleotide system «Saury-Ivasi-VKO»**

| Содержание целевой матрицы | | Результат ПЦР по каналу, Ct средняя | | | Результат* |
|---|---|---|---|---|---|
| | | FAM/Green ДНК сайры | ROX/Orange ДНК иваси | Cy5/Red ДНК ВКО | |
| **Сырой фарш** | | | | | |
| Сайра | 10 % | 19,57 | Детекцию на данном канале не проводили | 17,60 | + |
| Сайра | 1 % | 23,63 | | 21,19 | + |
| Сайра | 0,1 % | 27,60 | | 24,96 | + |
| Сайра | 0,01 % | 31,56 | | 28,42 | + |
| Иваси | 10 % | Детекцию на данном канале не проводили | 19,42 | 18,43 | + |
| Иваси | 1 % | | 23,42 | 22,07 | + |
| Иваси | 0,1 % | | 26,95 | 25,54 | + |
| Иваси | 0,01 % | | 30,29 | 29,13 | + |
| **Консервированные образцы** | | | | | |
| Сайра | 10 % | 20,87 | Детекцию на данном канале не проводили | 19,79 | + |
| Сайра | 1 % | 24,85 | | 23,35 | + |
| Сайра | 0,1 % | 29,07 | | 26,90 | + |
| Сайра | 0,01 % | 33,26 | | 30,57 | + |
| Иваси | 10 % | Детекцию на данном канале не проводили | 23,41 | 18,84 | + |
| Иваси | 1 % | | 27,28 | 22,36 | + |
| Иваси | 0,1 % | | 31,06 | 26,20 | + |
| Иваси | 0,01 % | | 34,50 | 29,65 | + |

* *Примечание*: «+» — наличие специфической реакции, целевая ДНК обнаружена; «–» — отсутствие специфической реакции, целевая ДНК отсутствует

Таблица 6. **Результаты исследования образцов пищевой рыбной продукции из сайры и дальневосточная сардина (иваси)**
Table 6. **Results of the analysis of the samples of food fish products from Pacific saury and Far Eastern sardine (ivasi)**

| Продукция / состав | Количество исследованных образцов | Результаты исследования: количество образцов — видовая принадлежность состава | % выявления несоответствия |
|---|---|---|---|
| Сайра тихоокеанская натуральная или с добавлением масла / Сайра | 109 | 74 — сайра (*Cololabis saira*)<br>10 — сайра (*Cololabis saira*) и дальневосточная сардина (иваси) (*Sardinops melanostictus*)<br>8 — дальневосточная сардина (иваси) (*Sardinops melanostictus*)<br>12 — тихоокеанская сельдь (*Clupea pallasii*)<br>5 — дальневосточная сардина (иваси) (*Sardinops melanostictus*) и тихоокеанская сельдь (*Clupea pallasii*) | 32 |
| Сардина (иваси) тихоокеанская натуральная или с добавлением масла / Дальневосточная (тихоокеанская) сардина (иваси) | 40 | 40 — дальневосточная сардина (иваси) (*Sardinops melanostictus*) | 0 |
| Сайра тихоокеанская и сардина (иваси) тихоокеанская натуральная или с добавлением масла / Сайра и сардина (иваси) тихоокеанские | 46 | 33 — сайра (*Cololabis saira*) и дальневосточная сардина (иваси) (*Sardinops melanostictus*)<br>13 — дальневосточная сардина (иваси) (*Sardinops melanostictus*) | 28 |

Результаты, полученные в ходе настоящего исследования, подтверждают высокую актуальность проблемы фальсификации рыбной продукции как на международном, так и на российском уровне. Во всем мире фиксируются многочисленные случаи замены дорогостоящих видов рыбы более дешевыми аналогами, что наносит ущерб потребителям и честным производителям. По оценкам экспертов, нелегальный оборот рыбы и фальсификация могут приводить к экономическим потерям в размере $26–50 млрд ежегодно [20]. Средний уровень несоответствия видового состава в рыбной продукции, по результатам глобальных обзоров, составляет порядка 30 % [21], хотя в отдельных выборках он может достигать 40 % и более [20]. В России проблема также актуальна: по результатам проверки Роскачества, более половины консервов сайры на рынке оказались фальсифицированными — вместо заявленной сайры содержали другую, более дешевую рыбу. В ходе анализа консервов 19 торговых марок (ТМ) «Сайра тихоокеанская (куски) натуральная с добавлением масла» только в 8 ТМ была подтверждена подлинность состава[2]. По данным исследований, проведенных в 2021–2023 годах в испытательной референс-лаборатории ФГБУ «НЦБРСП», из 281 исследованного образца консервированной продукции из сайры в 95 образцах (более 30 %) сайра отсутствовала. Наиболее часто сайру заменяли дальневосточной сардиной, которая была выявлена в 21 % случаев (Рисунок 4).

[2] Роскачество. В каких консервах сайру заменяют более дешевой рыбой? Электронный ресурс: https://rskrf.ru/tips/spetsproekty/v-kakikh-konservakh-sayru-zamenyayut-bolee-deshevoy-ryboy/ Дата доступа 13.01.2025

Данные, полученные в нашем исследовании с использованием разработанной ПЦР-тест-системы, также демонстрируют наличие несоответствий в маркировке продукции, включая случаи полной подмены одного вида другим. Сопоставление с приведенными выше независимыми источниками подтверждает, как достоверность разработанной методики, так и ее практическую значимость в условиях ограниченного лабораторного ресурса. Разработка быстрых и доступных методов видовой идентификации, таких как ПЦР-РВ, является ключевым элементом в борьбе с фальсификацией и в формировании прозрачного рынка рыбной продукции. Важно отметить, что примененная нами методика мультиплексной ПЦР-РВ продемонстрировала высокую эффективность при проверке консервированной продукции. Во-первых, метод обладает исключительной специфичностью: ни в одном из 90 образцов ДНК других видов рыб (представителей 42 семейств), использованных для валидации, не было получено ложноположительной реакции на сайру или сардину. Это означает, что разработанные праймеры и зонды гарантированно распознают только целевые виды (*Cololabis saira, Sardinops melanostictus*), не реагируя на посторонние ДНК. Во-вторых, система показала высокую чувствительность: установленный предел обнаружения составляет 0,01 % — метод способен зафиксировать примесь целевого вида, даже если его доля в образце не превышает одной сотой процента.

При сравнении с ранее опубликованными методами молекулярной идентификации рыбных видов, такими как секвенирование по Сенгеру [14] и баркодирование ДНК [15], предложенная методика мультиплексной ПЦР-РВ обладает рядом преимуществ. В отличие от секвенирования, которое требует значительных временных




**Результаты исследований за 2021–июнь 2023 гг.: 281 образец**
Соответствуют заявленному составу: 66 %
Не соответствуют составу: 34 %, из них:
21 % — дальневосточная сардина (иваси) (*Sardinops melanostictus*);
6 % — тихоокеанская сельдь (*Clupea pallasii*);
5 % — подмес к сайре дальневосточной сардины (иваси) (*Sardinops melanostictus*);
1 % — атлантическая сельдь (*Clupea harengus*).
1 % — атлантическая скумбрия (*Scomber scombrus*).

Рисунок 4. **Процент несоответствия по видовому составу продукции из сайры (данные испытательной референс-лаборатории НЦБРСП)**
Figure 4. **Percent of nonconformity by the species composition of the products from Pacific saury (data of the test reference laboratory of NCSFAP)**

и финансовых затрат, а также от сложного пост-анализа, предложенная ПЦР-РВ обеспечивает экспресс-идентификацию видов в течение 1,5–2 часов, что делает ее более применимой для рутинного контроля. По сравнению с традиционными методами баркодирования ДНК, основанными на амплификации универсальных маркеров с последующей секвенцией, предложенный метод обладает высокой специфичностью за счет использования видоспецифичных праймеров и флуоресцентных зондов. Это исключает необходимость дополнительного секвенирования и облегчает интерпретацию результатов.

Более того, в отличие от одноцелевых ПЦР-методов [15], предложенная мультиплексная система олигонуклеотидов «Сайра-Иваси-ВКО» позволяет одновременно детектировать несколько мишеней (сайру, иваси и внутренний контроль), что значительно повышает информативность анализа. Аналогичные подходы использовались в исследованиях Тимошкиной и соавторов [22] при идентификации осетровых видов, однако примененный ими метод имел меньшую чувствительность и не обеспечивал детекцию минимальных концентраций целевой ДНК в сложных матрицах.

Полученные нами данные согласуются с результатами зарубежных исследований, использовавших методы ПЦР и секвенирования для контроля рыбной продукции. Так, в работе Mariani и др. [23] было показано ~30 % несоответствий в маркировке рыбных блюд в Европе, причем применение ДНК-анализа (секвенирование, баркод-генов) позволило точно установить вид подмены в каждом случае. Наш подход дает сопоставимый эффект: комбинированное использование мультиплексной ПЦР (как инструмента быстрого скрининга) и выборочного секвенирования (для идентификации неизвестных видов в случаях несоответствия) обеспечивает и скорость, и полноту информации о составе продукта. Аналогичную стратегию предлагают зарубежные авторы для мониторинга особо ценных видов: например, в работе Xiong и др. [24] предложено сначала проводить количественную ПЦР с видовыми пробами для выявления подмены осетровой икры, а затем подтверждать находки секвенированием для юридически значимого доказательства. Такой двухэтапный подход сочетает преимущества обеих технологий и минимизирует их недостатки.

Таким образом, обсуждаемое исследование демонстрирует, что отечественная методика ПЦР-РВ для сайры и сардины не уступает мировым аналогам по чувствительности и специфичности, а по скорости выполнения значительно превосходит традиционные подходы. Результаты проверки реальных образцов (консервов из розничной сети) показали сопоставимый с мировыми статистический уровень фальсификации (~30 %) и подтвердили востребованность внедрения экспресс-анализа. Полученные данные согласуются с глобальной картиной: проблема подмены рыбной продукции имеет международный масштаб, и Россия не является исключением. Внедрение разработанного ПЦР-метода в практику контроля может заметно повысить прозрачность рынка: быстрота и экономичность тестирования создают предпосылки для регулярного мониторинга продукции. Это отвечает современным тенденциям развития методов пищевой безопасности и рекомендациям международных организаций, призывающих усиливать научно-техническую базу для борьбы с пищевым мошенничеством [25]. В перспективе расширение панели детекции (например, добавление зондов для выявления других потенциальных примесей — сельди, скумбрии и пр.) и унификация методики на уровне государственных стандартов позволят существенно снизить долю фальсифицированной рыбной продукции на внутреннем рынке.

На основании разработанной методики в ФГБУ «ВГНКИ» утверждены методические рекомендации «Методика определения видовой принадлежности сайры (*Cololabis saira*) и дальневосточной сардины, иваси (*Sardinops melanostictus*), на основе ПЦР с детекцией в режиме реального времени[3] с системой олигонуклеотидов “САЙРА-ИВАСИ-ВКО”». Особенно актуальна разработанная методика для проведения рутинных исследований контроля требований ТР ТС 022/2011[4] «Пищевая продукция в части ее маркировки» и для выявления несоответствий по видовому составу консервированной продукции из сайры.

## 5. Выводы

Одной из главных причин актуальности разработанной ПЦР-методики является сходство органолептических характеристик сайры и дальневосточной сардины. Эта схожесть создает условия для их подмены в рыбной продукции, особенно в консервированной форме. Случаи фальсификации наносят ущерб добросовестным производителям, нарушают конкурентную среду и могут привести к снижению доверия потребителей. Подобные практики не только искажают рыночные отношения, но и несут риски для здоровья населения, особенно при отсутствии адекватного контроля. В этих условиях важно внедрение комплексных решений: использование цифровых платформ государственного контроля (например, ФГИС «Меркурий») в сочетании с лабораторной идентификацией состава продукции с применением ПЦР-РВ. При этом необходимо учитывать, что большинство российских испытательных лабораторий уже оснащены оборудованием для ПЦР, но не располагают валидированными методами для видовой идентификации объектов морского промысла, что ограничивает эффективность надзора.

Разработанная методика мультиплексной ПЦР-РВ с системой олигонуклеотидов «Сайра-Иваси-ВКО» продемонстрировала высокую точность, чувствительность и воспроизводимость для идентификации видового состава как в сырой рыбной продукции, так и в переработанных продуктах. Применение данного метода в испытательных лабораториях существенно сокращает время и стоимость анализа, позволяя оперативно выявлять случаи фальсификации.

Мультиплексный формат тест-системы дает возможность одновременно идентифицировать несколько видов рыб, что особенно важно для контроля подмены тихоокеанской сайры дальневосточной сардиной (иваси). Это позволяет не только выявлять нарушения маркировки продукции, но и количественно оценивать уровень подмены, что может быть использовано для разработки нормативных стандартов и для усиления контроля в пищевой промышленности.

Кроме того, разработанный метод обладает высокой адаптивностью и может быть интегрирован в существующие системы контроля качества продуктов питания. В отличие от методов секвенирования,

[3] МР 24.12.2024 Методика определения видовой принадлежности сайры (Cololabis saira) и дальневосточной сардины, иваси (Sardinops melanostictus) на основе ПЦР с детекцией в режиме реального времени. Утверждена 24.12.2024 н. в ФГБУ «ВГНКИ»

[4] Технический регламент Таможенного союза ТР ТС 022/2011 «Пищевая продукция в части ее маркировки» (с изменениями на 14 сентября 2018 года). Утвержден Решением Комиссии Таможенного союза от 9 декабря 2011 года № 881.

требующих специализированного оборудования и сложного анализа, предложенная методика ПЦР-РВ может применяться широким кругом лабораторий без значительных затрат на дополнительное оснащение.

Таким образом, предложенная методика является надежным инструментом для обеспечения качества рыбной продукции, предотвращения фальсификации и защиты прав потребителей. Дальнейшие исследования могут быть направлены на адаптацию метода к анализу других видов рыб и морепродуктов, а также на расширение базы данных для повышения точности идентификации в сложных пищевых матрицах.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / REFERENCES


1. Suyama, S., Shimizu, A., Isu, S., Ozawa, H., Morioka, T., Nakaya, M. et al. (2016). Determination of the spawning history of Pacific saury Cololabis saira from rearing experiments: Identification of post-spawning fish from histological observations of ovarian arterioles. *Fisheries Science*, 82(3), 445–457. https://doi.org/10.1007/s12562-016-0980-1
2. Antonenko, D. V. (2023). Russian saury fishery and factors influencing its distribution in the Northwest Pacific Ocean. *Trudy VNIRO*, 194, 108–117. (In Russian) https://doi.org/10.36038/2307-3497-2023-194-108-117
3. Устинова Е. И., Филатов В. Н., Чульчеков Д. Н. (5–9 сентября 2022). *Изменения океанологических условий и их влияние на пространственное перемещение промысловых скоплений сайры, сардины и скумбрии в северо-западной части Тихого океана*. Развитие водных транспортных магистралей в условиях глобального изменения климата на территории Российской Федерации (Евразии) («Опасные явления — IV»). Ростов-на-Дону: ЮНЦ РАН, 2022. [Ustinova, E. I., Filatov, V. N., Chulchekov, D. N. (September 5–9, 2022). *Changes in the oceanological conditions and their effect on spatial movement of commercial concentrations of Pacific saury, sardine and mackerel in the North-Western part of the Pacific Ocean*. Development of the main transport waterways under the conditions of the global climate change on the territory of the Russian federation (Eurasia) (“Hazardous phenomena — IV”). Rostov-on-Don: SSC RAS. 2022.
4. Xing, Q., Yu, H., Liu, Y., Li, J., Tian, Y., Bakun, A. et al. (2022). Application of a fish habitat model considering mesoscale oceanographic features in evaluating climatic impact on distribution and abundance of Pacific saury (*Cololabis saira*). *Progress in Oceanography*, 201, Article 102743. https://doi.org/10.1016/j.pocean.2022.102743
5. Sarr, O., Kindong, R., Tian, S. (2021). Knowledge on the Biological and Fisheries Aspects of the Japanese Sardine, *Sardinops melanostictus* (Schlegel, 1846). *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(12), Article 1403. https://doi.org/10.3390/jmse9121403
6. Takasuka, A., Oozeki, Y., Kubota, H., Lluch-Cota, S. E. (2008). Contrasting spawning temperature optima: Why are anchovy and sardine regime shifts synchronous across the North Pacific? *Progress in Oceanography,* 77(2–3), 225–232. https://doi.org/10.1016/j.pocean.2008.03.008
7. Do, T. D., Wong, L. L. (2025). The investigation of seafood mislabeling in Asia: A review and coping strategies. *Journal of Agriculture and Food Research*, Article 101702. https://doi.org/10.1016/j.jafr.2025.101702
8. Лобачев, Д. (2023). И все-таки она сардина. Что за рыба иваси и с чем ее едят. Электронный ресурс: https://tass.ru/obschestvo/18253477 Дата доступа 12.05. 2025. [Lobacev, D. (2023). And yet it is sardine. What kind of fish is ivasi and what it is eaten with. Retrieved from https://tass.ru/obschestvo/18253477 Accessed May 12, 2025. (In Russian)]
9. Fanelli, V., Mascio, I., Miazzi, M. M., Savoia, M. A., De Giovanni, C., Montemurro, C. (2021). Molecular approaches to agri-food traceability and authentication: An updated review. *Foods*, 10(7), Article 1644. https://doi.org/10.3390/foods10071644
10. Galimberti, A., Casiraghi, M., Bruni, I., Guzzetti, L., Cortis, P., Berterame, N. M. et al. (2019). From DNA barcoding to personalized nutrition: The evolution of food traceability. *Current Opinion in Food Science,* 28, 41–48. https://doi.org/10.1016/j.cofs.2019.07.008
11. Armani, A., Castigliego, L., Tinacci, L., Gianfaldoni, D., Guidi, A. (2012). Multiplex conventional and real-time PCR for fish species identification of *Bianchetto* (juvenile *Sardina pilchardus*), *Rossetto* (*Aphia minuta*), and icefish in fresh, marinated and cooked products. *Food Chemistry,* 133(1), 184–192. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.12.076
12. Murray, M. G., Thompson, W. F. (1980). Rapid isolation of high molecular weight plant DNA. *Nucleic Acids Research*, 8(19), 4321–4325. https://doi.org/10.1093/nar/8.19.4321
13. Boom, R., Sol, C. J., Salimans, M. M. M., Jansen, C. L., Wertheim-Van Dillen, P. M., Van Der Noordaa, J. (1990). Rapid and simple method for purification of nucleic acids. *Journal of Clinical Microbiology*, 28(3), 495–503. https://doi.org/10.1128/jcm.28.3.495-503.1990
14. Cutarelli, A., Galiero, G., Capuano, F., Corrado, F. (2018). Species identification by means of mitochondrial cytochrome b DNA sequencing in processed anchovy, sardine and tuna products. *Food and Nutrition Sciences*, 9(4), 369–375. https://doi.org/10.4236/fns.2018.94029
15. Ramos, A., Santos, C., Mateiu, L., Gonzalez, M. del M., Alvarez, L., Azevedo, L. et al. (2013). Frequency and pattern of heteroplasmy in the complete human mitochondrial genome. *PLoS ONE*, 8(10), Article e74636. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0074636
16. National Center for Biotechnology Information (NCBI). Retrieved from https://www.ncbi.nlm.nih.gov/ Accessed June 13, 2025.
17. Basic Local Alignment Search Tool (BLAST). Retrieved from https://blast.ncbi.nlm.nih.gov/Blast.cgi Accessed June 13, 2025.
18. Integrated DNA Technologies. Web service for determining the physical properties of oligonucleotides OligoAnalyzer. Retrieved from https://eu.idtdna.com/pages/tools/oligoanalyzer Accessed June 13, 2025.
19. WHO. (2022). WHO global strategy for food safety 2022–2030: Towards stronger food safety systems and global cooperation. Geneva 27, Switzerland, 2022.
20. Revealed: Seafood fraud happening on a vast global scale. Retrieved from https://www.theguardian.com/environment/2021/mar/15/revealed-seafood-happening-on-a-vast-global-scale Accessed June 13, 2025.
21. Luque, G. M., Donlan, C. J. (2019). The characterization of seafood mislabeling: A global meta-analysis. *Biological Conservation,* 236, 556–570. https://doi.org/10.1016/j.biocon.2019.04.006
22. Timoshkina, N. N., Vodolazhskii, D. I., Usatov, A. V. (2011). Molecular-genetic markers in studies of intra- and interspecies polymorphism in sturgeon (acipenseriformes). *Russian Journal of Genetics: Applied Research,* 1(2), 160–171. https://doi.org/10.1134/S2079059711020122
23. Mariani, S., Griffiths, A. M., Velasco, A., Kappel, K., Jérôme, M., Perez-Martin, R. I. et al. (2015). Low mislabeling rates indicate marked improvements in European seafood market operations. *Frontiers in Ecology and the Environment,* 13(10), 536–540. https://doi.org/10.1890/150119
24. Xiong, X., Yuan, F., Huang, M., Cao, M., Xiong, X. (2020), Development of a rapid method for codfish identification in processed fish products based on SYBR Green real-time PCR. *International Journal of Food Science and Technology*, 55(4), 1843–1850. https://doi.org/10.1111/ijfs.14446
25. Seafood Fraud Becoming a Costly Global Concern. Retrieved from https://foodinstitute.com/focus/seafood-fraud-becoming-a-costly-global-concern Accessed June 13, 2025.

| СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ | AUTHOR INFORMATION |
|---|---|
| **Принадлежность к организации** | **Affiliation** |
| **Фомина Татьяна Алексеевна** — кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Лаборатория молекулярной биологии и биоинформатики, Федеральный научный центр пищевых систем им. В. М. Горбатова<br>109316, Москва, ул. Талалихина, 26<br>Начальник отдела молекулярно-диагностических исследований испытательной референс-лаборатории, Национальный центр безопасности рыбной и сельскохозяйственной продукции<br>129626, Москва, Графский переулок, 14–1<br>E-mail: fomina1032@yandex.ru<br>ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8848-0632 | **Tatyana A. Fomina**, Candidate of Technical Sciences, Senior Research Scientist, Laboratory of Molecular Biology and Bioinformatics, V. M. Gorbatov Federal Research Center for Food Systems<br>26, Talalikhin str., 109316, Moscow, Russia<br>Head of the Department of Molecular Diagnostic Research at the Testing Reference Laboratory, Nation Center for Fish and Agricultural Product Safety<br>14–1, Grafskiy per., 129626, Moscow, Russia<br>E-mail: fomina1032@yandex.ru<br>ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8848-0632 |
| **Хвостов Даниил Владиславович** — кандидат технических наук, научный сотрудник, лаборатория «Молекулярной биологии и биоинформатики», Федеральный научный центр пищевых систем им. В. М. Горбатова<br>109316, Москва, ул. Талалихина, 26<br>E-mail: d.hvostov@fncps.ru<br>ORCID: http://orcid.org/0000-0002-3445-4559<br>* автор для контактов | **Daniil V. Khvostov**, Candidate of Technical Sciences, Scientific Worker, Laboratory of Molecular Biology and Dioinformatics, V. M. Gorbatov Federal Research Center for Food Systems<br>26, Talalikhin str., 109316, Moscow, Russia<br>E-mail: d.hvostov@fncps.ru<br>ORCID: http://orcid.org/0000-0002-3445-4559<br>* corresponding author |
| **Минаев Михаил Юрьевич** — кандидат технических наук, руководитель лаборатории Молекулярной биологии и биоинформатики, Федеральный научный центр пищевых систем им. В. М. Горбатова<br>109316, г. Москва, ул. Талалихина, 26<br>E-mail: m.minaev@fncps.ru<br>ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0038-9744 | **Mikhail Yu. Minaev**, Candidate of Technical Sciences, Head of Laboratory of Molecular Biology and Bioinformatics, V. M. Gorbatov Federal Research Center for Food Systems<br>26, Talalikhin str., 109316, Moscow, Russia<br>E-mail: m.minaev@fncps.ru<br>ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0038-9744 |
| **Утьянов Дмитрий Александрович** — кандидат технических наук, научный сотрудник, лаборатория «Научно-методические работы, биологические и аналитические исследования», Федеральный научный центр пищевых систем им. В. М. Горбатова<br>109316, Москва, ул. Талалихина,26<br>E-mail: d.utyanov@fncps.ru<br>ORCID: https://orcid.org/ 0000-0001-7693-3032 | **Dmitry A. Utyanov**, Candidate of Technical Sciences, Scientific Worker, Laboratory of Scientific and Methodical Work, Biological and Analytical Research, V. M. Gorbatov Federal Research Center for Food Systems<br>26, Talalikhin str., 109316, Moscow, Russia<br>E-mail: d.utyanov@fncps.ru<br>ORCID: https://orcid.org/ 0000-0001-7693-3032 |
| **Критерии авторства** | **Contribution** |
| Авторы в равных долях имеют отношение к написанию рукописи и одинаково несут ответственность за плагиат. | The authors are equally involved in writing the manuscript and are 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/10.21323/2618-9771-2025-8-3-335-342

Поступила 20.02.2025
Поступила после рецензирования 24.07.2025
Принята в печать 28.07.2025
© Зинина О. В., Вишнякова Е. А., Науменко Н. В., Ребезов М. Б., 2025

https://www.fsjour.com/jour
Научная статья
Open access

# ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ЭКСТРАКЦИИ БИОАКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ ИЗ ВИШНЕВОГО ЖМЫХА

Зинина О. В.[1]*, Вишнякова Е. А.[1], Науменко Н. В.[1], Ребезов М. Б.[2]

[1] Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), Челябинск, Россия
[2] Федеральный научный центр пищевых систем им. В. М. Горбатова, Москва, Россия

*КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:*
*вишня, вишневый жмых, экстракция, ферментация, оптимизация*

АННОТАЦИЯ

Ежегодно сокоперерабатывающие предприятия производят тонны ягодного жмыха, содержащего в себе массу полезных веществ, среди которых огромное место занимают полифенольные вещества, обладающие антиоксидантными свойствами. Извлечение веществ с антиоксидантными свойствами из данного сырья является перспективным направлением для создания функциональных ингредиентов для продуктов питания. Целью исследований является установление оптимальных параметров экстракции полифенольный соединений из жмыхов ягод вишни. Для определения оптимальных условий процесса экстракции использовали двухфакторный эксперимент. Зависимыми переменными являлись содержание полифенолов и флавоноидов, варьируемыми факторами — продолжительность (от 10 до 50 мин) и температура экстракции (от 40 до 60 °С). Экстракцию проводили 50 %-ным раствором этанола. Опытные образцы жмыхов перед экстракцией подвергали ферментной обработке целлюлазой в течение 1 ч при температуре 50 °С. У полученных экстрактов определяли содержание флавоноидов спектрофотометрически, а также полифенолов методом Фолина-Чокальтеу. Результаты исследований показали, что для наиболее эффективной экстракции флавоноидов рекомендуется использовать температуру экстракции 47,17 °С, а период экстракции составляет 49,9 мин. При данных параметрах прогнозируемое суммарное содержание флавоноидов в пересчете на рутин составит 5,22 %. Для достижения содержания полифенолов 1,21 мг экв. галловой кислоты температуру экстракции рекомендуется поддерживать на уровне 49,8 °С, а период экстракции составит 38,1 мин. Содержание полифенолов в экстрактах, полученных по оптимальным параметрам, составило на 4,5 % выше прогнозируемого значения, а флавоноидов — на 5 % ниже. Содержание биофлавоноидов после ферментной обработки жмыха увеличилось примерно в 2 раза, а полифенолов — в 1,4 раза. Таким образом, математическое моделирование процесса экстракции позволяет быстро и достаточно точно спрогнозировать оптимальные параметры процесса для получения экстрактов с высоким содержанием биоактивных веществ. Предварительная ферментная обработка жмыха позволяет повысить выход биоактивных веществ.

**Received 20.02.2025**
**Accepted in revised 24.07.2025**
**Accepted for publication 28.07.2025**
© Zinina O. V., Vishnyakova E. A., Naumenko N. V., Rebezov M. B., 2025

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

# OPTIMIZATION OF THE EXTRACTION PROCESS OF BIOACTIVE SUBSTANCES FROM CHERRY POMACE

Oksana V. Zinina[1]*, Elena A. Vishnyakova[1], Natalia V. Naumenko[1], Maksim B. Rebezov[2]

[1] South Ural State University, Chelyabinsk, Russia
[2] V. M. Gorbatov Federal Research Center for Food Systems, Moscow, Russia

*KEY WORDS:*
*cherry, cherry pomace, extraction, fermentation, optimization*

ABSTRACT

Every year juice processing plants produce tons of berry pomace containing a lot of useful substances. A huge place among them is occupied by polyphenolic substances with antioxidant properties. Extraction of substances with antioxidant properties from this raw material is a promising direction for the creation of functional ingredients for food products. The aim of the research is to establish the optimal parameters for the extraction of polyphenolic compounds from cherry berry pomace. A two-factor experiment was used to determine the optimal conditions for the extraction process. The dependent variables were the content of polyphenols and flavonoids, and the variable factors were the duration (from 10 to 50 min) and temperature of extraction (from 40 to 60 °C). Extraction was carried out with a 50 % ethanol solution. Before extraction, the experimental samples of pomace were subjected to enzymatic treatment with cellulase for 1 hour at a temperature of 50 °C. The obtained extracts were analyzed for flavonoid content spectrophotometrically, as well as polyphenols using the Folin-Ciocalteu method. The results of the studies showed that for the most effective extraction of flavonoids, it is recommended to use an extraction temperature of 47.17 °C, and the extraction period is 49.9 min. With these parameters, the predicted total flavonoid content in terms of rutin will be 5.22 %. To achieve a polyphenol content of 1.21 mg equiv. of gallic acid, it is recommended to maintain the extraction temperature at 49.8 °C with the extraction period of 38.1 min. The content of polyphenols in the extracts obtained according to the optimal parameters was 4.5 % higher than the predicted value, and content of flavonoids was 5 % lower. The content of bioflavonoids after enzymatic treatment of the pomace increased approximately 2 times, and polyphenols 1.4 times. Thus, mathematical modeling of the extraction process allows for quick and fairly accurate prediction of the optimal process parameters for obtaining extracts with a high content of bioactive substances. Preliminary enzymatic treatment of pomace allows for an increase in the yield of bioactive substances.

## 1. Введение

Промышленная переработка сельскохозяйственного сырья влечет за собой образование большого количества вторичных ресурсов, которые в настоящее время не всегда эффективно используются.

Производство соков и других напитков из плодов, ягод и овощей является значимой частью пищевой промышленности Российской Федерации. Соки получают путем механического воздействия на сырье, а также консервацией физическими способами. При производстве

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: **Зинина, О. В., Вишнякова, Е. А., Науменко, Н. В., Ребезов, М. Б.** (2025). Оптимизация процесса экстракции биоактивных веществ из вишневого жмыха. *Пищевые системы*, 8(3), 335–342. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-3-335-342

FOR CITATION: **Zinina, O. V., Vishnyakova, E. A., Naumenko, N. V., Rebezov, M. B.** (2025). Optimization of the extraction process of bioactive substances from cherry pomace. *Food Systems*, 8(3), 335–342. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-3-335-342

соков все составные водорастворимые элементы (витамины, сахара, минеральные вещества) практически полностью переходят в сок, а нерастворимые (клетчатка, каротиноиды, липиды и др.) в большей степени остаются в жмыхах. Таким образом, жмыхи — это натуральный побочный продукт высокой влажности, оставшийся в результате экстракции при переработке фруктов, овощей и других видов сырья и обладающий высокой пищевой ценностью.

Отходы данного производства находят применение в изготовлении различных видов напитков, в виде обогащающих добавок в различные продукты питания. Однако это лишь малая часть от всего объема данного вида отходов. Большая же часть идет на корм скоту или перерабатывается на удобрения. В настоящее время существует потребность в комплексной переработке вторичного растительного сырья, оставляемого после различных видов обработки фруктов, ягод и овощей [1].

Вишня — высокоценная и наиболее распространенная косточковая культура, что обусловлено неповторимым вкусом ее плодов, пригодностью к большому виду переработки и биологическими особенностями, определяющими ее выращивание практически во всех зонах садоводства России.

По объемам выращивания и сбора вишни Российская Федерация является одной из стран-лидеров. Жители России высоко ценят характерный кисло-сладкий вкус этой ягоды. Соки, морсы и другие напитки из плодов вишни также пользуются большим спросом.

В зависимости от сорта вишни выход сока может варьироваться от 67 % до 84 % от изначальной массы сырья. Другими словами, в процессе производства вишневого сока образуется порядка 160–330 кг на 1 т сырья. Данные отходы в основном идут на корм скоту, что является колоссальной тратой ценного ресурса, поскольку огромная часть полезных веществ остается в выжимках [2].

Менее половины (порядка 35 %) ежегодно выращиваемой вишни непосредственно употребляется в пищу. Остальная часть ягод перерабатывается до пюре, варенья, мармелада, компота, концентратов и соков, препаратов для использования кондитерскими или молочными предприятиям, например, в ароматической выпечке, йогурте и подобных продуктах [3].

Плоды вишни — богатый источник полифенольных веществ. Особую ценность представляют сорта с темноокрашенными ягодами, богатыми антоцианами. По их содержанию черноплодные сорта вишни мало уступают черной смородине. Необходимо отметить, что антоцианы вишни распределены по всей мякоти, а не сосредоточены в кожице, как у черной смородины.

В Таблице 1 представлены усредненные значения биохимических характеристик разных сортов вишни.

Таблица 1. **Усредненные значения биохимического состава плодов вишни [4,5]**

Table 1. **Average values of the biochemical composition of cherry fruits [4,5]**

| Показатель | Среднее содержание |
|---|---|
| Растворимые сухие вещества, % | 17,3 |
| Сахара (сумма), % | 10,4 |
| Титруемая кислотность, % | 1,56 |
| Аскорбиновая кислота, мг/100г | 15,8 |
| Сахарокислотный индекс | 7,0 |
| Катехины, мг/100 г | 334 |
| Антоцианы, мг/100 г | 155,4 |

Полифенолы — это уникальные фенольные соединения, содержащие большое количество гидроксильных и карбоксильных структур. Пищевые полифенолы включают фенольные кислоты и флавоноиды, которые представляют собой очень большой класс, состоящий из флавонов, флавонолов, дигидрофлавонолов, изофлавонов, антоцианидинов и проантоцианидинов. Эти соединения отвечают за полезные для здоровья свойства фруктов, включая их антиоксидантные, противовоспалительные и антигипертензивные свойства [6,7].

Полифенолы, полученные из экстрактов вишни, способны снижать рост *Salmonella* и *E. Coli*, а также ингибировать развитие *Listeria* spp. [8].

Известно, что соединения полифенольной природы способны ингибировать окисление липидов в подсолнечном масле за счет своих антиоксидантных свойств [9]. Наноэмульсии полифенолов, используемые в качестве покрытия и консерванта, способны не только ингибировать микробное загрязнение, но и подавлять окисление липидов и образование нежелательных побочных продуктов метаболизма, тем самым продлевая срок годности продукта [10]. Натуральные полифенольные соединения (фитохимикаты) могут быть использованы в качестве потенциальных белковых сшивающих, противопожарных, антимикробных и антиоксидантных агентов для улучшения или поддержания качества водных продуктов. Полифенолы в форме натурального сырого экстракта или в чистом виде являются потенциальными альтернативами синтетическим добавкам для предотвращения ухудшения качества и окисления в водных пищевых системах/продуктах [11].

В многочисленных классах вторичных растительных метаболитов флавоноиды представляют собой полифенольный подкласс с уникальными свойствами, повсеместно распространенный в растительном мире, в большинстве тканей растений (листья, плоды, цветы, семена и т. д.). Важность молекул флавоноидов для здоровья человека связана с их применимостью в таких областях, как фармацевтическая и косметическая промышленность, а также с их питательным и нутрицевтическим потенциалом [12].

Шесть из двенадцати структурно различных подгрупп флавоноидов имеют диетическое значение и включают антоцианидины (например, пеларгонидин, цианидин), флаван-3-олы (например, эпикатехин, эпигаллокатехин), флавонолы (например, кверцетин, кемпферол), флавоны (например, лютеолин, байкалеин), флаваноны (например, гесперетин, наринген) и изофлавоны (даидзеин, генистеин).

Польза флавоноидов для здоровья связана с их структурными характеристиками, такими как количество и положение гидроксильных групп и наличие двойных связей C2 C3, которые предопределяют их способность хелатировать ионы металлов, прекращать образование активных форм кислорода и взаимодействовать с биологическими мишенями, вызывая биологическую реакцию. На основании этих структурных характеристик флавоноиды могут проявлять как антиоксидантные, так и прооксидантные свойства, модулировать активность ферментов, поглощающих активные формы кислорода [13].

Известно, что некоторые флавоноиды, в частности рутин, кверцетин, хризин, кемпферол, апигенин, наринген, силимарин, витексин и другие, проявляют противораковую активность на различных типах клеточных линий посредством различных механизмов, таких как остановка клеточного цикла, активация каспазы, и многих других [14].

Некоторые флавоноиды проявляют свою антибактериальную активность посредством подавления синтеза нуклеиновых кислот, нарушения функции цитоплазматической мембраны и энергетического обмена [15]. Биофлавоноид гесперетин может облегчить расстройства сна у пациентов с гипертонией [16].

Флавоноиды могут дополнять лекарства от гипертонии и гиперлипидемии, улучшая эндотелиальную функцию, снижая артериальное давление и уровень холестерина, тем самым способствуя здоровью сердечно-сосудистой системы [17].

Исследования показывают, что потребление продуктов, богатых флавоноидами, таких как черника, яблоки, красное вино, апельсины и чай, может способствовать здоровому старению [18].

Основными традиционными методами экстракции биоактивных веществ являются экстракция Сокслета, мацерация, отвар, настой и перколяция. Традиционно, на протяжении многих лет, эти методы были основным способом извлечения этих соединений из растительных тканей. Наиболее важным параметром, влияющим на выход и химический состав экстракта, в этих методах является тип растворителя. Наиболее распространенными растворителями, которые показывают самые высокие результаты экстракции, являются метанол, этанол и ацетон в концентрациях 60–80 %.

Другими параметрами, влияющими на выход экстракции, могут быть соотношение растворителя и твердого вещества, время и температура экстракции, размер частиц образца и степень перемешивания. Тем не менее эти методы имеют ряд существенных недостатков, таких как необходимость использования большого количества чистого растворителя и его недостаточная регенерация в конце процесса, длительное время экстракции, воздействие высоких температур в течение длительного периода времени, разрушение термочувствительных компонентов, низкая воспроизводимость и селективность.

В связи с недостатками традиционных методов извлечения исследователи сосредоточились на поиске новых технологий, обладающих меньшими ограничениями и большими преимуществами (Таблица 2).

В последние годы были разработаны инновационные и экологически безопасные технологии экстракции. Одной из таких технологий является экстракция «умными» растворителями, такими как растворители глубокого плавления или природные глубокие

Таблица 2. **Современные способы экстракции биоактивных веществ из жмыхов**
Table 2. **Modern methods for extraction of bioactive substances from pomace**

| Способ экстракции биоактивных веществ из жмыхов | Суть метода | Источник |
|---|---|---|
| Фракционирование под высоким давлением | Метод предполагает использование $CO_2$ на первой стадии, за которой следует экстракция растворителем с различными смесями $CO_2$ и этанолом (10–100 % по объему) при температуре 50 °C и давлении 25 Мпа | [19] |
| Ультразвуковая экстракция | 0,4 г свежего/сухого образца и 10 мл бидистиллированной воды добавляют в центрифужную пробирку объемом 15 мл, содержащую две стеклянные диаметром 3 мм для предотвращения осаждения образцов. Экстракцию проводят с использованием ультразвукового аппарата при следующих условиях: амплитуда 25 %, мощность 200 Вт, частота 20 кГц и время экстракции 9 мин. Для предотвращения перегрева и поддержания начальной температуры (20 ± 2 °C) экстракцию проводят в 60-секундных циклах с 10-секундными паузами, а экстракционную ячейку помещают в лед на протяжении всего процесса. Полученные смеси центрифугируют при 4000 × g в течение 10 мин при температуре 4 °C с последующей фильтрацией | [20] |
| Биопереработка с использованием природных глубоких эвтектических растворителей | 1 г высушенных выжимок обрабатывают 10 г растворителей в течение 1 ч при температуре 50 °C. Затем смесь охлаждают до комнатной температуры, разбавляют MeOH/$H_2O$ (70/30). Фильтруют для отделения нерастворенного остатка, который собирают и высушивают при 60 °C. Супернатант концентрируют при пониженном давлении для удаления MeOH, а затем используют полимерную смолу Amberlite XAD-7 для отделения фенольных соединений из водной фазы, содержащей растворители. Растворители собирают путем промывания абсорбированной полифенол-полимерной смолы водой. Полученную таким образом водную фракцию выпаривают при пониженном давлении. Затем после сушки смолы под потоком воздуха извлеченные полифенолы десорбируют из смолы с помощью MeOH. Затем метанольный экстракт выпаривают при пониженном давлении для извлечения полифенольных экстрактов в виде твердых остатков | [21] |
| Обработка холодной плазмой с дальнейшей экстракцией ультразвуком | Обработка холодной атмосферной плазмой лиофилизированного жмыха проводится с применением генератора плазмы, использующего технологию пьезоэлектрического прямого разряда. Генератор питается от постоянного напряжения 12 В с частотой 50 кГц. Для генерации плазмы используется атмосферный воздух. Воздействие на растительную матрицу реактивных видов, содержащихся в холодной плазме, разрушает эпидермальные клетки и вызывает экстракцию | [22] |
| Твердофазная ферментация с использованием пробиотических микроорганизмов | Отдельные штаммы инокулируют в яблочные выжимки в соотношении 5 % (*w*/*w*), после чего материалы помещают в конические колбы объемом 250 мл для твердофазной ферментации при температуре 37 °C в течение 48 ч | [23] |
| Ферментация выжимок молочнокислыми бактериями | Лиофилизированные выжимки помещают в стеклянную банку с дистиллированной водой (1:5), а затем пастеризуют при температуре 90 °C в течение 10 мин для удаления посторонней микрофлоры. Пастеризованные выжимки инокулируют 5 % (об./об.) реактивированными культурами (8 log КОЕ/мл) и ферментируют при 37 °C в течение 1–4 дней без перемешивания | [24] |

эвтектические растворители. К «зеленым» технологиям также относятся следующие методы экстракции: экстракция жидкостью под давлением, экстракция подкритической водой, экстракция сверхкритическим флюидом, экстракция с помощью микроволн, экстракция с помощью ультразвука и экстракция с помощью энзимов.

По сравнению с традиционными методами, эти способы находят все более широкое применение при извлечении биологически активных компонентов из растительных тканей. Среди преимуществ «зеленых» технологий — высокая скорость и эффективность экстракции, автоматизация, высокая селективность, сохранение фенольных соединений, улучшенная экстракция термочувствительных компонентов, сокращенное время обработки и уменьшенное использование органических растворителей, признанных безопасными. Тем не менее за счет новизны использования нестандартного оборудования и реактивов данные способы пока не получили достаточного распространения [19].

Большинство способов извлечения полифенольных соединений заключается в использовании агрессивных растворителей и/или сложного дорогостоящего оборудования. Поэтому в последние годы ученые находятся в поиске щадящих способов обработки сырья для лучшего извлечения биоактивных веществ, все чаще применяют ферментацию [23].

Ферментативная экстракция является перспективным подходом перехода к более чистому промышленному производству. Данная технология обладает рядом преимуществ, а именно: снижение риска возможного загрязнения конечного продукта токсичными веществами; минимизирование производственных затрат; уменьшение воздействия на окружающую среду [25]. Воздействие ферментов способствует эффективному разрушению растительных клеток, усиливая высвобождение биоактивных соединений из различных агропромышленных отходов и побочных продуктов во время последующей твердожидкостной экстракции [26]. Ферментативная экстракция является устойчивой и более селективной альтернативой химического гидролиза, используемого для высвобождения неэкстрагируемых полифенолов из пищевых матриц. Для проведения ферментации жмыхов используют ферменты с различной активностью: ß-глюканазы, протеазы, целлюлазы, ксиланазы, полигалактуроназы и пектиназы [27]. Данный вид экстракции предлагает эффективный способ не только увеличить выход продукта после экстракции и сократить время экстракции, но и улучшить качество самого процесса.

Ферментативная экстракция обладает рядом преимуществ, а именно: снижение риска возможного загрязнения конечного продукта токсичными веществами; минимизирование производственных затрат; уменьшение воздействия на окружающую среду [25].

Целью исследований является установление оптимальных параметров экстракции полифенольных соединений из жмыхов ягод вишни.

## 2. Объекты и методы

Объектами исследования являются:

- вишня сорта «Щедрая» (сорт выведен в Уральском НИИ сельского хозяйства (Россия), место сбора — Челябинская область, сезон — лето 2024 г.);
- вишневый жмых, оставшийся после получения сока из вишни сорта «Щедрая». Сок получали механически с использованием соковыжималки-пресса СВР-01М (Россия);
- экстракты, полученные из жмыха вишни сорта «Щедрая».

Экстракты получали двумя способами: контрольный образец был получен без предварительной ферментации сырья, опытные образцы — с предварительной ферментацией.

Для ферментации использовали фермент «Целлюлаза» (ТД «Биопрепарат», Россия). Это фермент класса гидролаз, катализирующий гидролиз β(1,4)-гликозидных связей в целлюлозе с образованием глюкозы или дисахарида целлобиозы. Представляет собой комплекс двух ферментов: эндо- и экзоглюканаз. Целлюлаза первого типа расщепляет целлюлозу неупорядоченно, с образованием фрагментов разной длины. Действие фермента второго типа приводит к образованию дисахарида целлобиозы, а также глюкозы. Биохимические свойства: активность 10000 ед/г; рабочий диапазон pH 2,0–6,5, оптимальная температура 50–65 °C.

Технологии получения контрольного и опытных образцов экстрактов из жмыхов вишни сорта «Щедрая» представлены на Рисунке 1.

Ферментация проводилась при температуре 50 °C в течение 1 часа в буферном растворе с pH 6,0. Предварительно сырье гомогенизировали в течение 1 минуты с помощью гомогенизатора Stegler S-10 (Langfang Zhihang Science Instrument Co., Ltd., Китай).

Экстракцию проводили при температурах 40 °C, 50 °C и 60 °C в течение 10, 30 и 50 минут. Для изготовления контрольного образца без предварительной ферментации экстракция проводилась при температуре 50 °C длительностью 30 мин [27].

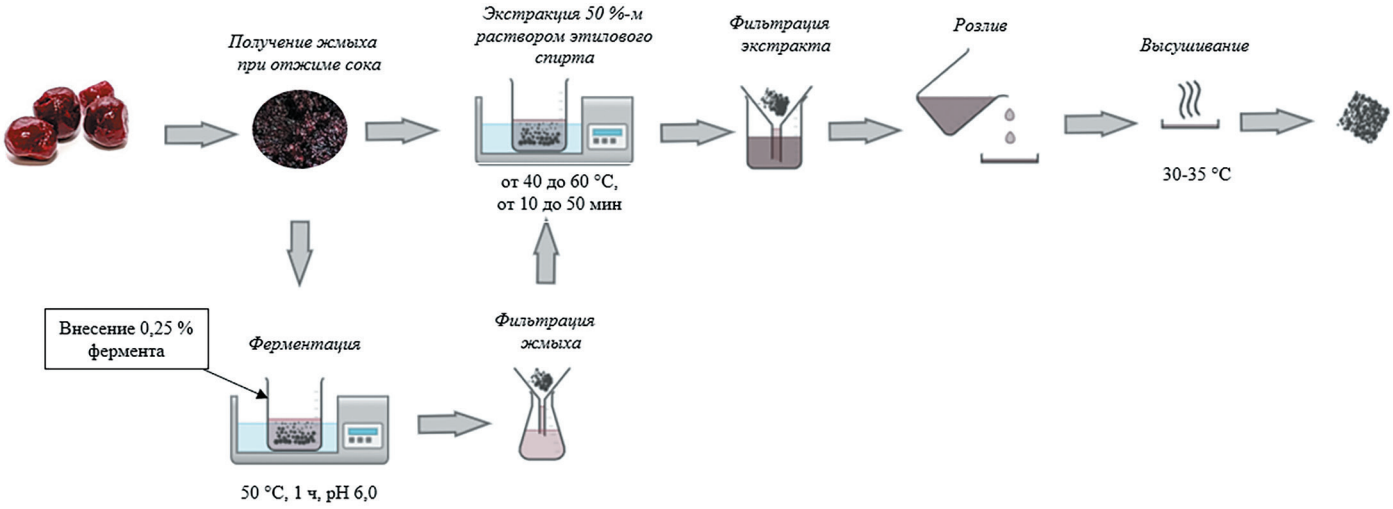



Рисунок 1. **Технология получения экстрактов из вишневого жмыха**
Figure 1. **Technology for production of extracts from cherry pomace**

Для определения оптимальных условий процесса экстракции использовали двухфакторный эксперимент. Полный факторный эксперимент по типу $3^k$, где $k$ — количество факторов, 3 — количество уровней (min, max, центр). Количество опытов определяли как $N = 3^k$ при $k = 2$ для двухфакторного эксперимента, число опытов составило $N = 9$.

В качестве зависимых переменных выбраны содержания флавоноидов ($Y_1$) и полифенолов ($Y_2$) в экстрактах, определяемые спектрофотометрически по методикам, описанным ниже. Варьируемые параметры: время экстракции ($X_1$) в диапазоне от 10 до 50 мин с шагом 20 мин; температура экстракции ($X_2$) в диапазоне от 40 до 60 °С с шагом 10 °С. В соответствии с планом эксперимента (Таблица 3) получено 9 опытных образцов экстрактов при пятикратном повторении эксперимента.

Таблица 3. **Матрица планирования эксперимента**
Table 3. **Experimental design matrix**

| № п/п | $X_1$ | $X_2$ | $Y_1$ | $Y_2$ |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 40 (−1) | 10 (−1) | $1{,}500 \pm 0{,}005^{i}$ | $0{,}359 \pm 0{,}001^{i}$ |
| 2 | 40 (−1) | 30 (0) | $1{,}817 \pm 0{,}008^{e}$ | $0{,}873 \pm 0{,}004^{e}$ |
| 3 | 40 (−1) | 50 (+1) | $1{,}937 \pm 0{,}008^{d}$ | $0{,}956 \pm 0{,}004^{d}$ |
| 4 | 50 (0) | 10 (−1) | $2{,}778 \pm 0{,}009^{c}$ | $1{,}061 \pm 0{,}006^{c}$ |
| 5 | 50 (0) | 30 (0) | $3{,}173 \pm 0{,}019^{a}$ | $1{,}087 \pm 0{,}007^{b}$ |
| 6 | 50 (0) | 50 (+1) | $2{,}930 \pm 0{,}016^{b}$ | $1{,}101 \pm 0{,}008^{a}$ |
| 7 | 60 (+1) | 10 (−1) | $1{,}682 \pm 0{,}006^{h}$ | $0{,}423 \pm 0{,}002^{h}$ |
| 8 | 60 (+1) | 30 (0) | $1{,}745 \pm 0{,}006^{g}$ | $0{,}451 \pm 0{,}002^{g}$ |
| 9 | 60 (+1) | 50 (+1) | $1{,}781 \pm 0{,}007^{f}$ | $0{,}463 \pm 0{,}002^{f}$ |

*Примечание*: значения представляют собой средние значения ± SEM, $n = 5$. Средние значения в строке без общей надстрочной буквы различаются ($p < 0{,}05$) при анализе с помощью двухфакторного дисперсионного анализа и теста Тьюки.

Влияние независимых переменных $X_1$ и $X_2$ на зависимые переменные анализировали в программе MathCAD (PTC: order # 2456861 # 2497812).

Уравнение нелинейной регрессии для двухфакторного эксперимента в общем виде представлено следующим образом:

$$Y = a_0 + a_1 \cdot X_1 + a_2 \cdot X_2 + a_{12} \cdot X_1 \cdot X_2 + a_{11} \cdot X_1^2 + a_{22} \cdot X_2^2 \quad (1),$$

где $a_0$ — значение $Y$ в центре плана; $a_1$ и $a_2$ — коэффициенты, характеризующие степень влияния факторов $X_1$ и $X_2$ на функцию $Y$; $a_{12} \cdot X_1 \cdot X_2$ учитывает эффект влияния взаимодействия 1-го и 2-го факторов на $Y$; коэффициент $a_{12}$ характеризует степень этого влияния; $a_{11}$ и $a_{22}$ — коэффициенты, характеризующие степень влияния квадратов факторов $X_1$ и $X_2$ на функцию $Y$.

Для полученного уравнения регрессии определяли следующие показатели: коэффициенты регрессии, надежность уравнения по коэффициенту детерминации ($R^2$) и адекватности модели по критерию Фишера (*Fkr*), статистическую значимость параметров уравнения регрессии по критерию Стьюдента (*t*).

При выполнении экспериментальных работ использовали следующие материалы и реактивы: спирт этиловый 95 % (ООО «Гиппократ», Россия), галловая кислота степенью чистоты 98 % (АО «Вектон», Россия), алюминий хлористый степенью чистоты 99 % (АО «Вектон», Россия), рутин степенью чистоты не менее 97 % (Acros Organics, Бельгия), реактив Фолина-Чокальтеу (АО «Вектон», Россия), натрий углекислый чда (АО «Вектон», Россия), 2,2-Дифенил-1-Пикрилгидразил (CDH, Индия).

В полученных экстрактах определяли содержание флавоноидов и полифенолов. Для этого 10 г жмыха заливали 100 мл дистиллированной воды и тонко измельчали гомогенизатором Stegler S-10 (Langfang Zhihang Science Instrument Co., Ltd., Китай), а для экстрактов готовили 1 %-ный спиртовый раствор.

Определение суммарного содержания флавоноидов основано на установлении оптической плотности раствора при длине волны 560 нм.

В мерную пробирку помещали 2 мл исследуемого раствора, добавляли 2 мл 2,5 %-ного раствора хлорида алюминия в 95 %-ном этаноле и 1 мл 95 %-ного этанола. Через 30 мин измеряли оптическую плотность раствора на спектрофотометре СФ-2000 («ОКБ Спектр», Россия) при длине волны 560 нм в кювете с толщиной слоя 10 мм.

Для приготовления стандартных растворов рутина в диапазоне концентраций 20–100 мкг/мл использовали 50 %-ный раствор этанола.

Количественное определение суммарного содержания полифенолов проводили методом Фолина-Чокальтеу. 0,1 мл каждого образца экстракта смешивали с 0,1 мл реагента Фолина-Чокальтеу, 1 мл 20 %-ного раствора карбоната натрия и 8,8 мл дистиллированной воды, 30 мин выдерживали в темноте и измеряли оптическую плотность на спектрофотометре СФ-2000 («ОКБ Спектр», Россия) при 765 нм. В качестве стандарта использовали галловую кислоту, и результаты выражали в мг-эквивалентах галловой кислоты.

Для разведений галловой кислоты в 50 %-ном растворе этанола (25–250 мг/л; $R^2 = 0{,}996$) определяли оптическую плотность, по полученным данным строили калибровочную кривую, для которой получили соответствующее уравнение:

$$y = 1{,}6798 \cdot x + 0{,}0296, \quad (2)$$

где $y$ — оптическая плотность раствора; $x$ — концентрация галловой кислоты, мг/л.

У экстрактов, полученных по оптимальным параметрам, также определили антирадикальную активность методом DPPH и содержание антоцианов спектрофотометрическим методом.

Для расчета антирадикальной активности (*APA*) использовали этанольный раствор DPPH 60 мкМ, 3 мл которого смешивали с 3 мл исследуемого раствора (1 %-ный раствор экстракта), инкубировали в темноте в течение 30 мин. Поглощение измеряли на спектрофотометре СФ-2000 («ОКБ Спектр», Россия) при 515 нм.

Параллельно готовили контрольный раствор, состоящий из равных количеств спирта и раствора DPPH.

*APA* рассчитывали по формуле (3) [28]:

$$APA = \frac{D_k - D_{обр}}{D_k} 100, \quad (3)$$

где $D_k$ — оптическая плотность раствора DPPH (0,6248); $D_{обр}$ — оптическая плотность образца.

Определение суммарного содержания антоцианов проводили по методу pH-дифференциальной спектрофотометрии. Массовую концентрацию суммы антоцианов в пересчете на цианидин-3-глюкозид определяли на основе изменения поглощения света с длиной волны 510 нм при изменении кислотности раствора от 1 до 4,4 ед. pH. Для этого в две мерные колбы помещали по 2,5 см аликвоты пробы, разбавленной с дистиллированной водой 1:5, и доводили до метки буферными растворами с 1,0 и 4,5 ед. pH.

Содержимое в колбах перемешивали, выдерживали в течение 15 мин и проводили измерение оптической плотности каждого раствора при длинах волн 510 и 700 нм соответственно.

Разность оптических плотностей ⊗A вычисляли как разность оптических плотностей растворов при разных длинах волн и соответствующих значениях pH по формуле (4) [29]:

$$\otimes A = (A_{510} - A_{700})_{pH1} - (A_{510} - A_{700})_{pH4,5}, \quad (4)$$

где $A_{510}$ — оптическая плотность раствора пробы при длине волны 510 нм, е. о. п.; $A_{700}$ — оптическая плотность раствора пробы при длине волны 710 нм, е. о. п.

Массовую концентрацию антоцианов в экстрактах C, мг/дм$^3$ в пересчете на цианидин-3-глюкозид вычисляли по формуле (5) [29]:

$$C = \frac{\Delta A \cdot M \cdot V_1 \cdot 10^3}{V_2 \cdot \varepsilon \cdot I}, \quad (5)$$

где $\Delta A$ — разность оптической плотности раствора, е. о. п.; $M$ — молекулярная масса цианидин-3-глюкозид, равная 449,2 г/моль; $V_1$ — вместимость мерной колбы, взятой для разбавления, см$^3$; $V_2$ — объем аликвоты, взятой на определение, см$^3$; ε — молярный коэффициент экстинкции цианидин-3-глюкозида; ε = 26900 дм$^3$·моль$^{-1}$·см$^{-1}$; I — длина оптического пути кюветы, см.

Данные были проанализированы с помощью однофакторного дисперсионного анализа и теста Тьюки с применением программных пакетов Microsoft Excel и программного обеспечения в свободном доступе, предложенного Assaad и др. [30].

Количество повторов эксперимента составило 5.

Значения вероятности $p \leqslant 0,05$ приняты для указания статистической значимости.

## 3. Результаты и обсуждение

Матрица планирования эксперимента и результаты определения содержания полифенолов и флавоноидов представлены в Таблице 3.

В результате расчетов в программе MathCad было получено уравнение регрессии, которое отражает зависимость суммарного содержания флавоноидов в пересчете на рутин ($Y_1$), %, от параметров экстракции вишневого жмыха:

$$Y_1 = -3,592 \cdot 10^{-4} \cdot X_1^2 - 0,012 \cdot X_2^2 - 4,225 \cdot 10^{-4} \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,048 \cdot X_1 + 1,229 \cdot X_2 - 28,451, \quad (6)$$

где $X_1$ — время экстракции, мин; $X_2$ — температура экстракции, °C.

При сравнении $p$-значений в пределах независимых переменных отмечена высокая степень достоверности коэффициентов регрессии для параметра «температура экстракции» ($X_2$) ($p \leqslant 0,001$). В то же время параметры «квадрат времени экстракции» ($X_1^2$) ($p \geqslant 0,05$), а также взаимодействие параметров ($X_1 \cdot X_2$) ($p \geqslant 0,05$) не оказали влияния на суммарное содержание флавоноидов в пересчете на рутин. О высокой точности модели можно судить по коэффициенту детерминации $R^2$ = 0,996. Также расчеты показали, что модель адекватна, т. е. хорошо объясняет общую дисперсию зависимой переменной ($F$-статистика = 152,1, $F_{кр}$ = 3,44).

С учетом значимости коэффициентов уравнение (6) будет иметь следующий вид:

$$Y_1 = -0,012 \cdot X_2^2 + 0,048 \cdot X_1 + 1,229 \cdot X_2 - 28,451. \quad (7)$$

На поверхности отклика зависимая переменная фиксировалась на центральном уровне (ось $Z$), а влияние двух независимых переменных на отклик — на осях ($Y$ и $X$) (Рисунок 2). Используя уравнение (7), можно регулировать необходимый уровень экстракции жмыха в зависимости от необходимого содержания биоактивных веществ.

Оптимальные параметры экстракции, полученные в программе MathCAD при построении поверхности отклика, показали, что для наиболее эффективной экстракции флавоноидов рекомендуется использовать следующие значения: температура — 47,17 °C, период экстракции — 49,9 мин, прогнозируемое суммарное содержание флавоноидов в пересчете на рутин — 5,22 %.

В программе MathCad также было получено уравнение множественной регрессии, отражающее изменение содержания полифенолов ($Y_2$), мг экв. галловой кислоты, при варьировании параметров экстракции вишневого жмыха.

$$Y_2 = -1,913 \cdot 10^{-4} \cdot X_1^2 - 4,955 \cdot 10^{-3} \cdot X_2^2 - 6,962,1 \cdot 10^{-4} \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,052 \cdot X_1 + 0,4502 \cdot X_2 - 11,93, \quad (8)$$

где $X_1$ — время экстракции, мин; $X_2$ — температура экстракции, °C.

При сравнении p-значений в пределах независимых переменных отмечена высокая степень достоверности коэффициентов регрессии для параметра «температура экстракции» ($X_2$) ($p \leqslant 0,001$). В то же время параметр «время экстракции» ($X_1$) ($p$ = 0,083) имеет пограничную значимость, а взаимодействие параметров ($X_1 \cdot X_2$) ($p \geqslant 0,05$) и квадрат времени экстракции ($X_2^2$) ($p \geqslant 0,05$) не оказали влияния на суммарное содержание полифенолов. Высокое значение коэффициента детерминации ($R^2$ = 0,945) и F-статистика = 10,32 ($F_{кр}$ = 3,44) подтверждают высокую точность модели и ее адекватность.

С учетом этих данных и значимости коэффициентов уравнение (8) будет иметь следующий вид:

$$Y_2 = -4,955 \cdot 10^{-3} \cdot X_2^2 + 0,052 \cdot X_1 + 0,4502 \cdot X_2 - 11,93. \quad (9)$$

На поверхности отклика зависимая переменная фиксировалась на центральном уровне (ось $Z$), а влияние двух независимых переменных на отклик — на осях ($Y$ и $X$) (Рисунок 3). Используя уравнение

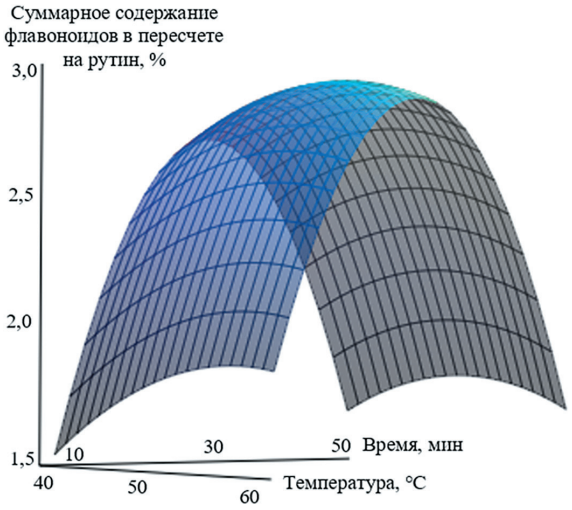



Рисунок 2. **Трехмерная диаграмма поверхности отклика суммарного содержания флавоноидов в пересчете на рутин при экстракции вишневого жмыха в зависимости от факторов: температура и период экстракции**

Figure 2. **Three-dimensional response surface diagram of the total content of flavonoids in terms of rutin upon extraction of cherry pomace depending on the factors: temperature and extraction period**

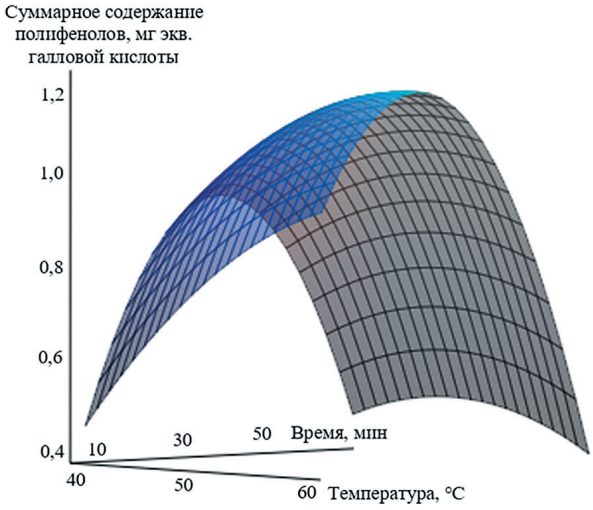



Рисунок 3. **Трехмерная диаграмма поверхности отклика суммарного содержания полифенолов при экстракции вишневого жмыха в зависимости от факторов: температура и период экстракции**

Figure 3. **Three-dimensional response surface diagram of the total content of polyphenols upon extraction of cherry pomace depending on the factors: temperature and extraction period**

(9), можно регулировать содержание полифенолов в экстрактах в зависимости от параметров экстракции. Так, например, для достижения содержания полифенолов 1,21 мг экв. галловой кислоты температуру экстракции рекомендуется поддерживать на уровне 49,9 °С, а период экстракции составит 57,9 мин.

Для проверки работы модели по оптимальным параметрам экстракции изготовлены экстракты и оценены антиоксидантные свойства. В Таблице 4 представлены результаты исследования экстрактов, изготовленных при температуре 47,17 °С с длительностью экстракции 49,9 мин, а также результаты исследований контрольного образца (без предварительной ферментации сырья). Прогнозируемые значения получены подстановкой параметров экстракции в уравнение (7) для определения теоретического содержания флавоноидов и в уравнение (9) для определения содержания полифенолов.

Таблица 4. **Результаты исследования экстрактов**

Table 4. **Results of the analysis of the extracts**

| Образец | Суммарное содержание флавоноидов в пересчете на рутин, % | Суммарное содержание полифенолов | |
|---|---|---|---|
| | | мг экв. галловой кислоты/л | мг экв. галловой кислоты/г сухого веса |
| Контрольный образец экстракта | 2,533 ± 0,118[b] | 0,908 ± 0,034[b] | 96,596 ± 4,177[b] |
| Оптимальный опытный образец экстракта | 4,957 ± 0,132[a] | 1,268 ± 0,047[a] | 134,894 ± 5,750[a] |
| Прогнозируемое значение при заданных условиях | 5,216 | 0,876 | 128,723 |

*Примечание*: результаты в строках с одинаковыми буквами существенно не различаются при $p < 0,05$ по критерию Тьюки.

Отличие прогнозируемого значения содержания флавоноидов от экспериментального составило около 5 %, что показывает адекватное описание модели уравнением (6).

Содержание полифенолов в образцах экстрактов, изготовленных по оптимальным условиям для получения флавоноидов, составило на 45 % больше, чем прогнозируемое по уравнению регрессии для флавоноидов. Такая разница в результатах показывает, что следует использовать уравнение регрессии с установленными для него оптимальными параметрами для получения ожидаемого (прогнозируемого) результата по содержанию конкретной группы биоактивных веществ, т. е. для получения определенного количества биофлавоноидов — уравнение (7), а полифенолов — уравнение (9).

В литературе встречаются экспериментальные данные определения полифенолов в экстрактах сладкой вишни, полученных при экстрагировании аналогичным растворителем в течение 60 мин [31]. Полученное значение составило около 40 мг экв. галловой кислоты на грамм сухого вещества, тогда как при использовании других прогрессивных методов экстракции содержание полифенолов в экстрактах увеличивалось до 170 мг. экв. галловой кислоты на грамм сухого веса [31]. Также в исследованиях зарубежных ученых отмечено, что температура экстракции от 47 °С до 56 °С максимизирует концентрацию фенольных соединений в экстрактах, полученных из вишневых жмыхов [32].

Отмечено, что повышение температуры экстракции до 50 °С приводит к лучшему извлечению фенольных соединений из жмыхов. Ученые объясняют это повышением эффективности массопереноса при умеренных температурах за счет повышения растворимости и диффузионной способности внутриклеточных соединений в растворителе, при одновременном снижении поверхностного натяжения и вязкости [33]. Время экстракции также является важным параметром, поскольку длительная экстракция приводит к разложению фенолов при длительной выдержке при высокой температуре.

У опытного образца экстракта содержание флавоноидов и полифенолов выше, чем в контрольном образце, что показывает эффективность предварительной ферментации сырья для более полного высвобождения биоактивных веществ из растительных клеток. Так, содержание биофлавоноидов после ферментной обработки сырья увеличилось примерно в 2 раза, а полифенолов — в 1,4 раза.

В научных публикациях также отмечено, что экстракты, полученные при ферментации жмыхов сладкой вишни, показали более высокое содержание проантоцианидинов и антиоксидантную способность, чем экстракты, полученные кислотным и щелочным гидролизом [34].

На Рисунке 4 представлены результаты определения антирадикальной активности и содержания антоцианов в вишневом соке и образцах экстрактов.

Результаты исследований показали, что содержание антоцианов снизилось в экстрактах по сравнению с их содержанием в свежевыжатом вишневом соке с 7,535 до 4,344 мг/дм³ в пересчете на цианидин-3-глюкозид ($p \leqslant 0,05$). Вероятно, это связано с известной нестойкостью данных химических веществ при воздействии света и способностью быстро разрушаться при воздействии воздуха. В то же время содержание антоцианов значительно выше оказалось в опытном образце экстракта, что коррелирует с данными о более высоком содержании в экстрактах, полученных с предварительной ферментацией сырья, полифенолов и биофлавоноидов. Экспериментальные данные подтверждают эффективность воздействия целлюлозы на клеточные стенки и способствуют более полному выходу биоактивных веществ в растворитель. Несмотря на более высокое содержание антоцианов в соке, более высокая антирадикальная активность отмечена в опытном образце экстракта, что подтверждает литературные данные об антиоксидантных свойствах не только антоцианов, но и других представителей полифенолов [35].

С учетом значительного содержания биоактивных веществ в вишневом жмыхе можно сделать вывод о высоком потенциале данного вторичного сырья для получения экстрактов. Многочисленные исследования экстрактов полифенолов в качестве добавок с антиоксидантными свойствами доказывают возможности их применения в продуктах питания для замедления окислительных процессов, а также в качестве натурального красителя или нутрицевтического компонента.

Однако ученые отмечают, что для сохранения свойств экстракта необходимо тщательно контролировать время и температуру хранения, а также применять технологии стабилизации свойств [36].

## 4. Выводы

Вишневый жмых, образуемый при переработке ягод вишни, содержит значительные количества биоактивных веществ и является перспективным источником для получения экстрактов. Широко

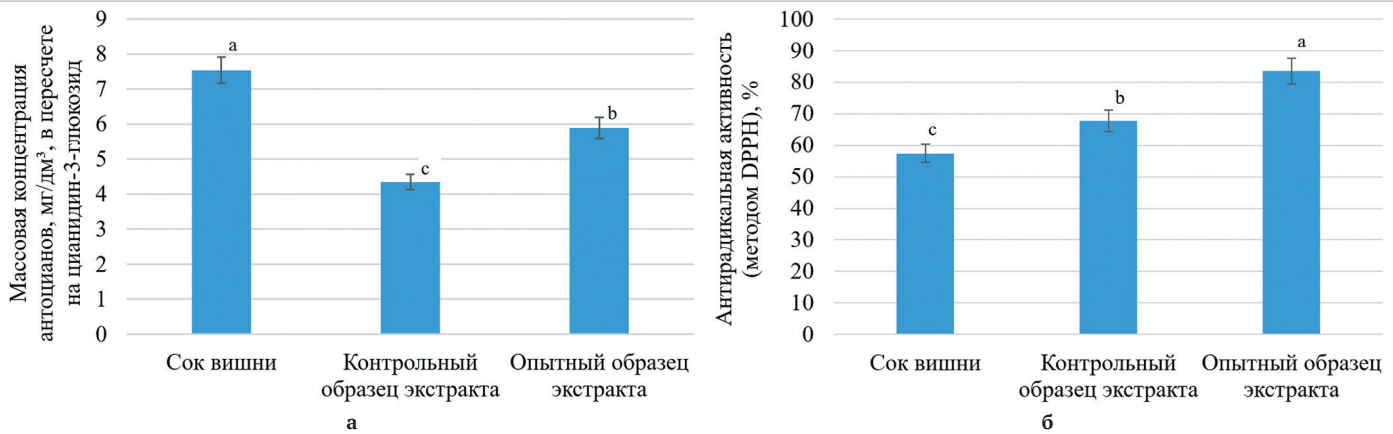



Рисунок 4. **Результаты определения содержания антоцианов (а) и антирадикальной активности (б) экстрактов (результаты с одинаковыми буквами существенно не различаются при $p < 0,05$ по критерию Тьюки)**

Figure 4. **Results of the determination of the antocyan content (a) and antiradical activity (б) of the extracts (results with the same letters are not significantly different at $p < 0.05$ according to the Tukey test)**

используют различные способы экстракции, но наиболее щадящими остаются методы с предварительной ферментацией сырья.

При проведении экстракции важными технологическими параметрами являются продолжительность и температура экстракции. Математическое моделирование процесса позволяет быстро спрогнозировать оптимальные параметры для получения ожидаемого эффекта. Однако следует использовать определенное уравнение регрессии с установленными для него оптимальными параметрами для получения ожидаемого (прогнозируемого) результата по содержанию определенных биоактивных веществ.

В результате проведения двухфакторного эксперимента получены уравнения нелинейной регрессии, показывающие зависимость суммарного содержания биоактивных веществ (флавоноидов и полифенолов) от параметров экстракции.

Методом построения поверхностей отклика получены оптимальные параметры экстракции для достижения прогнозируемого содержания флавоноидов и полифенолов. Для достижения содержания полифенолов 1,21 мг экв. галловой кислоты рекомендуется поддерживать температуру экстракции на уровне 49,9 °C, а период экстракции составит 57,9 мин.

Для наиболее эффективной экстракции флавоноидов рекомендуется использовать следующие параметры: температура — 47,17 °C, период экстракции — 49,9 мин, прогнозируемое суммарное содержание флавоноидов в пересчете на рутин — 5,216 %. Содержание флавоноидов в экстрактах, полученных при оптимальных параметрах, оказалось на 5 % ниже прогнозируемого значения.

Также следует отметить, что содержание флавоноидов и полифенолов в экстракте, полученном при оптимальных параметрах, оказалось выше, чем в контрольном образце. Это подтверждает эффективность предварительной ферментации сырья для более полного высвобождения биоактивных веществ из растительных клеток.

Таким образом, математическое моделирование процесса экстракции позволяет достаточно точно спрогнозировать оптимальные параметры процесса для получения экстрактов с высоким содержанием биоактивных веществ.

Извлечение полифенольных экстрактов из вишневого жмыха — перспективная альтернатива для получения натуральных добавок с антиоксидантными и колориметрическими свойствами. Они способны улучшать органолептические характеристики пищевых продуктов и продлевать срок их хранения.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / REFERENCES


1. Ермош, Л. Г., Присухина, Н. В., Фадеев, К. А. (2021). Использование отходов сокового производства для рецептурного состава ягодно-овощных чипсов. *Вестник КрасГАУ*, 6(171), 163–169. [Ermosh, L. G., Prisuhina, N. V., Fadeev, K. A. (2021). Use of juice production waste for recipe composition of berry-vegetable chips. *Bulletin of KSAU*, 6(171), 163–169. (In Russian)] https://doi.org/10.36718/1819-4036-2021-6-163-169
2. Салина, Е. С., Левгерова, Н. С., Сидорова, И. А. (2018) Технологическая характеристика новых сортов вишни селекции ВНИИСПК для производства сока. *Современное садоводство*, 2(26), 22–27. [Salina, E. S., Levgerova N. S., Sidorova I. A. (2018). Technological characteristics of new cherry varieties of VNIISPK breeding for juice production. *Contemporary Horticulture,* 2(26), 22–27. (In Russian)] https://doi.org/10.24411/2312-6701-2018-10204
3. Chatzimitakos, T., Athanasiadis, V., Kalompatsios, D., Kotsou, K., Mantiniotou, M., Bozinou, E. et al. (2024). Sustainable valorization of sour cherry (prunus cerasus) by-products: Extraction of antioxidant compounds. *Sustainability*, 16(1), Article 32. https://doi.org/10.3390/su16010032
4. Рахметова, Т. П., Ефремов, И. Н. (2020) Биохимическая характеристика плодов перспективных сортов вишни. *Вестник аграрной науки*, 4(85), 176–180. [Rakhmetova, T.P., Efremov, I.N. (2020). Biochemical characteristics of promising sour cherry cultivars fruits. *Bulletin of Agrarian Science*, 4(85), 176–180. (In Russian)] https://doi.org/10.17238/issn2587-666X.2020.4.176
5. Макаркина, М. А., Павел, А. Р., Ветрова, О. А. (2020). Биохимическая оценка сортов некоторых плодовых и ягодных культур селекции ВНИИСПК. *Вестник Российской сельскохозяйственной науки*, 4, 18–21. [Makarkina, M. A., Pavel, A. R., Vetrova O. A. (2020). Biochemical assessment of some fruit and berries varieties in selection of All-Russian Research Institute for Fruit Crop Breeding. *Vestnik of the Russian Agricultural Science*, 4, 18–21. (In Russian)] https://doi.org/10.30850/vrsn/2020/4/18-21
6. Bae, M., Le, C., Mehta, R. S., Dong, X., Pieper, L. M., Ramirez, L. et al. (2024). Metatranscriptomics-guided discovery and characterization of a polyphenol-metabolizing gut microbial enzyme. *Cell Host and Microbe*, 32(11), 1887–1896. https://doi.org/10.1016/j.chom.2024.10.002
7. Wei, X., Zhou, C., Luo, D., Jiang, G., Zhao, Z., Wang, W. et al. (2024). Insighting the effect of ultrasound-assisted polyphenol non-covalent binding on the functional properties of myofibrillar proteins from golden threadfin (*Nemipterus virgatus*). *Ultrasonics Sonochemistry*, 109, Article 106988. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2024.106988
8. Kołodziejczyk, K., Sójka, M., Abadias, M., Viñas, I., Guyot, S., Baron, A. (2013). Polyphenol composition, antioxidant capacity, and antimicrobial activity of the extracts obtained from industrial sour cherry pomace. *Industrial Crops and Products*, 51, 279–288. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2013.09.030
9. Tan, H. L., Ferrentino, G., Morozova, K., Tenuta, M. C., Scampicchio, M. (2025). Supercritical $CO_2$ extraction and fractionation of turmeric polyphenols: Antioxidant capacity and inhibition of lipid oxidation in sunflower oil. *Food Bioscience*, 69, Article 106906. https://doi.org/10.1016/j.fbio.2025.106906
10. Ma, Y., Wang, N., Liu, X., Ma, X., Meng, S., Zhao, J. et al. (2025). Construction of flaxseed polyphenol nanolipid emulsions as edible coatings and their application in shelf life extension of spiced beef. *Food Chemistry: X*, 27, Article 102502. https://doi.org/10.1016/j.fochx.2025.102502
11. Kamal, G. M., Uddin, J., Asmari, M., Noreen, A., Liaqat, A., Sabir, A. et al. (2025). Natural polyphenols as a promising aquatic food preservative: A concurrent review. *Journal of Agriculture and Food Research*, 22, Article 102046. https://doi.org/10.1016/j.jafr.2025.102046
12. Nicolescu, A., Bunea, C. I., Mocan, A. (2025). Total flavonoid content revised: An overview of past, present, and future determinations in phytochemical analysis. *Analytical Biochemistry*, 700, Article 115794. https://doi.org/10.1016/j.ab.2025.115794
13. Jomova, K., Alomar, S. Y., Valko, R., Liska, J., Nepovimova, E., Kuca, K. et al. (2025). Flavonoids and their role in oxidative stress, inflammation, and human diseases. *Chemico-Biological Interactions*, 413, Article 111489. https://doi.org/10.1016/j.cbi.2025.111489
14. Sahu, K. G., Khobragade, D. S., Patil, S. P. (2024). Anticancer flavonoids producing endophytic fungi: A review. *Journal of Holistic Integrative Pharmacy*, 5(4), 305–313. https://doi.org/10.1016/j.jhip.2024.11.002
15. Herlina, T., Akili, A. W. R., Nishinarizki, V., Hardianto, A., Latip, J. B. (2025). Review on antibacterial flavonoids from genus Erythrina: Structure-activity relationship and mode of action. *Heliyon*, 11(1), Article e41395. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e41395
16. Wang, X. J., Hu, Y. L., Huan, J. M., Jiang, F., Xin, L. Y., Hua, Z. et al. (2025). Systemic inflammatory biomarkers as mediators of the association between dietary flavonoids and sleep disorders in patients with hypertension: A population-based study. *Journal of Functional Foods*, 128, Article 106788. https://doi.org/10.1016/j.jff.2025.106788
17. Li, X., Xie, E., Sun, S., Shen, J., Ding, Y., Wang, J. et al. (2025). Flavonoids for gastrointestinal tract local and associated systemic effects: A review of clinical trials and future perspectives. *Journal of Advanced Research* (In Press). https://doi.org/10.1016/j.jare.2025.01.014
18. Bondonno, N. P., Liu, Y. L., Grodstein, F., Rimm, E. B., Cassidy, A. (2025). Associations between flavonoid-rich food and flavonoid intakes and incident unhealthy aging outcomes in older United States males and females. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 121(5), 972–985. https://doi.org/10.1016/j.ajcnut.2025.02.010
19. Serra, A. T., Seabra, I. J., Braga, M. E.M., Bronze, M.R., Sousa, H. C., Duarte, C. M. M. (2010). Processing cherries (*Prunus avium*) using supercritical fluid technology. Part 1: Recovery of extract fractions rich in bioactive compounds. *The Journal of Supercritical Fluids*, 55(1), 184–191. https://doi.org/10.1016/j.supflu.2010.06.005
20. Ebrahimi, P., Roodbali, A., Simonato, B., Lante, A., Rizzi, C. (2025). Unveiling the effects of sieving and drying on ultrasound-assisted extraction of bioactive compounds from spent sour cherry pomace. *Ultrasonics Sonochemistry*, 118, Article 107375. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2025.107375
21. Mero, A., Mezzetta, A., De Leo, M., Braca, A., Guazzelli, L. (2024). Sustainable valorization of cherry (*Prunus avium L.*) pomace waste via the combined use of (NA)DESs and bio-ILs. Electronic supplementary information (ESI) available. *Green Chemistry*, 26(10), 6109–6123. https://doi.org/10.1039/d4gc00526k
22. Loukri, A., Kissas, T., Kyriakoudi, A., Zymvrakaki, E., Stratakos, A. Ch., Mourtzinos, I. (2024). Coupling of cold atmospheric plasma treatment with ultrasound-assisted extraction for enhanced recovery of bioactive compounds from cornelian cherry pomace. *Food Chemistry*, 455, Article 139989. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.139989
23. Wang, Z., Tang, H., Li, Y., Tian, L., Ye, B., Yan, W. et al. (2024). Evaluating the dynamic effects of complex probiotics as cellulase replacements during fermentation of apple pomace. *International Journal of Food Microbiology*, 425, Article 110896. https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2024.110896
24. Uzun, D. E., Dikmetas, D. N., Karbancioglu-Guler, F., Tomas, M., Capanoglu, E. (2024). Exploring the impact of fermentation on bioactive compounds in two different types of carrot pomace. *Food Bioscience*, 61, Article 104646. https://doi.org/10.1016/j.fbio.2024.104646
25. Cho, E. J., Trinh, L. T. P., Song, Y., Lee, Y. G., Bae, H.-J. (2020). Bioconversion of biomass waste into high value chemicals. *Bioresource Technology,* 298, Article 122386. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122386
26. Ariwaodo, C. A., Olaniyan, O. F. (2024). Fleshy fruit waste and the green chemistry of its conversion to valuable products for humans and animals. *Food Chemistry Advances*, 4, Article 100634. https://doi.org/10.1016/j.focha.2024.100634
27. Domínguez-Rodríguez, G., Marina, M. L., Plaza M. (2022). *In vitro* assessment of the bioavailability of bioactive non-extractable polyphenols obtained by pressurized liquid extraction combined with enzymatic-assisted extraction from sweet cherry (*Prunus avium* L.) pomace. *Food Chemistry*, 385, Article 132688, https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.132688
28. Brand-Williams, W., Cuvelier, M., Berset, C. (1995). Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. *LWT- Food Science and Technology*, 28(1), 20–30. https://doi.org/10.1016/S0023-6438(95)80008-5
29. Rucaj, E., Carpentieri, S., Siano, F., Ferrari, G., Pataro, G. (2023). Optimizing the solvent extraction process for high-value compounds from sweet cherry press cake treated with pulsed electricfields using response surface methodology. *Frontiers in Food Science and Technology*, 3, Article 1273243. https://doi.org/10.3389/frfst.2023.1273243
30. Assaad, H. I., Zhou, L., Carroll, R. J., Wu, G. (2014). Rapid publication-ready MS-Word tables for one-way ANOVA. *Springer Plus*, 3, Article 474. https://doi.org/10.1186/2193-1801-3-474

31. Rrucaj, E., Carpentieri, S., Scognamiglio, M., Siano, F., Ferrari, G., Pataro, G. (2024). Sustainable valorization of industrial cherry pomace: A novel cascade approach using pulsed electric fields and ultrasound assisted-extraction. *Foods*, 13(7), Article 1043. https://doi.org/10.3390/foods13071043
32. Rrucaj, E., Carpentieri, S., Siano, F., Ferrari, G., Pataro, G. (2023). Optimizing the solvent extraction process for high-value compounds from sweet cherry press cake treated with pulsed electric fields using response surface methodology. *Frontiers in Food Science and Technology*, 3, Article 1273243. https://doi.org/10.3389/frfst.2023.1273243
33. Drevelegka, I., Goula, A. M. (2020). Recovery of grape pomace phenolic compounds through optimized extraction and adsorption processes. *Chemical Engineering and Processing — Process Intensification*, 149, Article 107845. https://doi.org/10.1016/j.cep.2020.107845
34. Domínguez-Rodríguez, G., Marina, M. L., Plaza, M. (2021). Enzyme-assisted extraction of bioactive non-extractable polyphenols from sweet cherry (*Prunus avium L.*) pomace. *Food Chemistry*, 339, Article 128086. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128086
35. Chezanoglou, E., Mourtzinos, I., Goula, A. M. (2024). Sweet cherry and its by-products as sources of valuable phenolic compounds. *Trends in Food Science and Technology*, 145, Article 104367. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2024.104367
36. Bulgari, D., Pisoni, L., Renzetti, S., Gobbi, E., Bertoli, N., Gargari, G. et al. (2025). Valorization of *Prunus cerasus* var. marasca pomace derived from industrial processing: Recovery, characterization, and bioactivity assessment of secondary metabolites. *Molecular Nutrition and Food Research*, Article e70087. https://doi.org/10.1002/mnfr.70087


| СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ | AUTHOR INFORMATION |
|---|---|
| **Принадлежность к организации** | **Affiliation** |
| **Зинина Оксана Владимировна** — доктор технических наук, профессор, кафедра «Пищевые и биотехнологии», Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)<br>454080, Челябинск, пр. Ленина, 76<br>E-mail: zinoks-vl@mail.ru<br>ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4817-1645<br>* автор для контактов | **Oksana V. Zinina**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Food and Biotechnology, South Ural State University (National Research University)<br>76, Lenin Av., Chelyabinsk, 454080, Russia<br>E-mail: zinoks-vl@mail.ru<br>ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4817-1645<br>* corresponding author |
| **Вишнякова Елена Александровна** — магистрант, Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)<br>454080, Челябинск, пр. Ленина, 76<br>E-mail: l_vishny@mail.ru<br>ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8557-9239 | **Elena A. Vishnyakova**, master's student, South Ural State University (National Research University)<br>76, Lenin Av., Chelyabinsk, 454080, Russia<br>E-mail: l_vishny@mail.ru<br>ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8557-9239 |
| **Науменко Наталья Владимировна** — доктор технических наук, профессор, кафедра «Пищевые и биотехнологии», Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)<br>454080, Челябинск, пр. Ленина, 76<br>E-mail: Naumenko_natalya@mail.ru<br>ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9520-3251 | **Natalia V. Naumenko**, Doctor of Technical Sciences, Professor of Department of Food and Biotechnology, South Ural State University (National Research University)<br>76, Lenin Av., Chelyabinsk, 454080, Russia<br>E-mail: Naumenko_natalya@mail.ru<br>ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9520-3251 |
| **Ребезов Максим Борисович** — доктор сельскохозяйственных наук, профессор, главный научный сотрудник, Федеральный научный центр пищевых систем им. В. М. Горбатова РАН<br>109316, Москва, ул. Талалихина, 26<br>E-mail: rebezov@ya.ru<br>ORCID: http://orcid.org/0000-0003-0857-5143 | **Maksim B. Rebezov**, Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Chief Researcher, V. M. Gorbatov Federal Research Center for Food Systems<br>26, Talalikhin str., Moscow, 109316, Russia<br>E-mail: rebezov@ya.ru<br>ORCID: http://orcid.org/0000-0003-0857-5143 |
| **Критерии авторства** | **Contribution** |
| Концептуализация — **Зинина О. В.** и **Ребезов М. Б.**;<br>методология — **Зинина О. В.** и **Ребезов М. Б.**;<br>исследование — **Вишнякова Е. А.**;<br>обработка и анализ данных — **Зинина О. В.** и **Науменко Н. В.**;<br>написание статьи и редактирование — **Зинина О. В.**, **Ребезов М. Б.**, **Науменко Н. В.**<br>Авторы в равных долях имеют отношение к написанию рукописи и одинаково несут ответственность за плагиат | Conceptualization — **Oksana V. Zinina** and **Maksim B. Rebezov**;<br>methodology — **Oksana V. Zinina** and **Maksim B. Rebezov**;<br>investigation — **Elena A. Vishnyakova**,<br>data curation and analysis — **Oksana V. Zinina** and **Natalia V. Naumenko**;<br>writing-article and editing — **Oksana V. Zinina**, **Maksim B. Rebezov** and **Natalia V. Naumenko**.<br>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/10.21323/2618-9771-2025-8-3-343-354

Received 11.04.2025
Accepted in revised 06.08.2025
Accepted for publication 11.08.2025
© Pratama B. P., Khairullah A. R., Ma'ruf I.F., Akintunde A. O., Mustofa I., Mulyati S., Ahmad, R. Z., Ansori A. N. M., 2025

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

# REVOLUTIONIZING CURCUMIN BIOAVAILABILITY: FROM HEALTH BENEFITS TO PLACEMENT IN FOOD PACKAGING PRODUCTS

Bima P. Pratama[1], Aswin R. Khairullah[2], Ilma F. Ma'ruf[3], Adeyinka O. Akintunde[4], Imam Mustofa[5], Sri Mulyati[5]*, Riza Z. Ahmad[2], Arif N. M. Ansori[6,7,8]

[1] Research Center for Agroindustry, National Research and Innovation Agency (BRIN), South Tangerang, Banten, Indonesia
[2] Research Center for Veterinary Science, National Research and Innovation Agency (BRIN), Bogor, West Java, Indonesia
[3] Research Center for Pharmaceutical Ingredients and Traditional Medicine, National Research and Innovation Agency (BRIN), Bogor, West Java, Indonesia
[4] Department of Agriculture and Industrial Technology, Babcock University, Ilishan-Remo, Ogun State, Nigeria
[5] Division of Veterinary Reproduction, Faculty of Veterinary Medicine, Universitas Airlangga, Surabaya, East Java, Indonesia
[6] Postgraduate School, Universitas Airlangga, Surabaya, East Java, Indonesia
[7] Medical Biotechnology Research Group, Virtual Research Center for Bioinformatics and Biotechnology, Surabaya, East Java, Indonesia
[8] Uttaranchal Institute of Pharmaceutical Sciences, Uttaranchal University, Dehradun, Uttarakhand, India

*KEY WORDS:*
*Curcumin, delivery system, encapsulation, packaging, human health*

ABSTRACT

Curcumin, the principal bioactive compound in turmeric (*Curcuma longa* L.), is widely recognized for its pharmacological properties, including antioxidant, anti-inflammatory, and anticancer activities. However, its low bioavailability remains a major obstacle in the development of curcumin-based applications in food and pharmaceutical sectors. This review provides a comprehensive overview of recent technological advancements aimed at enhancing curcumin's bioavailability, including encapsulation techniques, lipid-based delivery systems, and chemically modified curcumin derivatives. These innovations have demonstrated significant potential in improving the solubility, stability, and absorption of curcumin in the human body. Furthermore, recent trends in research utilizing natural carriers such as plant-derived proteins and polysaccharides are discussed, aligning with sustainable and food-safe delivery approaches. The review emphasizes an interdisciplinary approach that integrates food material science, biodegradable packaging, bioactive compound chemistry, and nanotechnology engineering. As formulation technologies continue to evolve, the application of curcumin in functional foods and health supplements becomes increasingly promising. The article also highlights existing research gaps and future directions, focusing on biological efficacy, long-term safety, and production scalability. This review aims to serve as a valuable reference for researchers and industry stakeholders in accelerating the utilization of curcumin through effective and sustainable smart delivery systems.

FUNDING: This study is supported by Rumah Program (RP) by Research Organization for Agriculture and Food (ORPP), BRIN TA 2025 Number B-34668/III.11/TK.01.02/12/2024 for a series of research related to curcumin and its development into biodegradable packaging/biofilm.

ACKNOWLEDGEMENTS: This research was supported and facilitated by the National Research and Innovation Agency (BRIN) through the Research Grant Program of Rumah Program ORPP BRIN, Fiscal Year 2025. The authors would like to express their sincere appreciation to BRIN for the funding and institutional support that made this study possible. Additionally, we thank Jalan Tengah, Indonesia (https://jalantengah.site) for editing the manuscript.

**Поступила 11.04.2023**
**Поступила после рецензирования 06.08.2025**
**Принята в печать 11.08.2025**
© Пратама Б. П., Хайрулла А. Р., Маруф И. Ф., Акинтунде А. О., Мустофа И., Муляти С., Ахмад Р. З., Ансори А. Н. М., 2025

https://www.fsjour.com/jour
Обзорная статья
Open access

# РЕВОЛЮЦИЯ В БИОДОСТУПНОСТИ КУРКУМИНА: ОТ ПОЛЬЗЫ ДЛЯ ЗДОРОВЬЯ ДО ПРИМЕНЕНИЯ В УПАКОВОЧНЫХ МАТЕРИАЛАХ ДЛЯ ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ

Бима П. Пратама[1], Асвин Р. Хайрулла[2], Ильма Ф. Маруф[3], Адейинка О. Акинтунде[4], Имам Мустофа[5], Шри Муляти[5]*, Риза З. Ахмад[2], Ариф Н. М. Ансори[6,7,8]

[1] Научно-исследовательский центр агропромышленности, Национальное агентство исследований и инноваций (BRIN), Южный Тангеранг, Бантен, Западная Ява, Индонезия
[2] Научно-исследовательский центр ветеринарных наук, Национальное агентство исследований и инноваций (BRIN), Богор, Западная Ява, Индонезия
[3] Научно-исследовательский центр фармацевтических ингредиентов и традиционной медицины, Национальное агентство исследований и инноваций (BRIN), Богор, Западная Ява, Индонезия
[4] Кафедра сельского хозяйства и промышленных технологий, Университет Бэбкока, Илишан-Ремо, штат Огун, Нигерия
[5] Кафедра ветеринарной репродукции, Факультет ветеринарной медицины, Университет Эйрлангга, Сурабая, Восточная Ява, Индонезия
[6] Департамент аспирантуры, Университет Эйрлангга, Сурабая, Восточная Ява, Индонезия
[7] Исследовательская группа медицинской биотехнологии, Виртуальный исследовательский центр биоинформатики и биотехнологии, Сурабая, Восточная Ява, Индонезия
[8] Институт фармацевтических наук Уттаранчала, Университет Уттаранчала, Дехрадун, Уттаранчал, Индия

FOR CITATION: **Pratama, B. P., Khairullah, A. R., Ma'ruf, I. F., Akintunde, A. O., Mustofa, I., Mulyati, S. et al.** (2025) Revolutionizing curcumin bioavailability: From health benefits to placement in food packaging products. *Food Systems,* 8(3), 343–354. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-3-343-354

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: **Пратама, Б. П., Хайрулла, А. Р., Маруф, И. Ф., Акинтунде, А. О., Мустофа, И., Муляти, С. и др.** (2025) Революция в биодоступности куркумина: от пользы для здоровья до применения в упаковочных материалах для пищевых продуктов. *Пищевые системы*, 8(3), 343–354. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-3-343-354

*КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:*
*куркумин, система доставки, инкапсуляция, упаковка, здоровье человека*

АННОТАЦИЯ

Куркумин, основное биоактивное вещество куркумы (*Curcuma longa* L.), широко известен своими фармакологическими свойствами, включая антиоксидантную, противовоспалительную и противораковую активность. Однако его низкая биодоступность остается серьезным препятствием для разработки продуктов на основе куркумина в пищевой и фармацевтической промышленности. В настоящей работе представлен всесторонний обзор последних технологических достижений, направленных на повышение биодоступности куркумина, включая методы инкапсуляции, системы доставки на основе липидов и химически модифицированные производные куркумина. Эти инновации продемонстрировали значительный потенциал в улучшении растворимости, стабильности и усвоения куркумина в организме человека. Кроме того, обсуждаются последние тенденции в исследованиях с использованием натуральных носителей, таких как растительные белки и полисахариды, в соответствии с подходами к устойчивой и безопасной для пищевых продуктов доставке. В обзоре подчеркивается междисциплинарный подход, объединяющий науку о пищевых материалах, биоразлагаемую упаковку, химию биоактивных соединений и нанотехнологическую инженерию. По мере развития технологии рецептур применение куркумина в функциональных продуктах питания и биологически активных добавках становится все более многообещающим. В статье также освещаются существующие пробелы в исследованиях и будущие направления, с упором на биологическую эффективность, долгосрочную безопасность и масштабируемость производства. Целью этого обзора является предоставление ценного справочного материала для исследователей и представителей отрасли для ускорения использования куркумина с помощью эффективных и устойчивых интеллектуальных систем доставки.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Это исследование спонсируется Программой Rumah (RP) Исследовательской организации по сельскому хозяйству и продовольствию (ORPP) BRIN TA 2025 № B-34668/III.11/TK.01.02/12/2024 для серии исследований, связанных с куркумином и его применением в биоразлагаемой упаковке/биопленке.

БЛАГОДАРНОСТИ: Исследование поддержано и организовано Национальным агентством исследований и инноваций (BRIN) посредством исследовательских грантов в рамках программы Rumah ORPP BRIN, 2025 финансовый год. Авторы хотели бы выразить искреннюю признательность BRIN за финансирование и институциональную поддержку, которые сделали это исследование возможным. Кроме того, мы благодарим Jalan Tengah, Индонезия (https://jalantengah.site) за редактирование рукописи.

## 1. Introduction

Food preservation and packing depend heavily on packaging [1]. Nevertheless, though it serves its primary function, the majority of the materials utilized in its production are petroleum-based plastic. Plastic is often thought to be non-biodegradable and challenging to recycle, both having an adverse effect on the environment [2]. The unchecked buildup of plastic garbage in nature, particularly in marine environments, upsets the species' biological balance and raises pollution levels [3]. The development of more effective recycling techniques is required to reduce the adverse environmental effects of food packaging. To develop biodegradable packaging materials that are effective at protecting food while also having little to no adverse environmental effects, new alternatives must be found.

The scientific community is becoming more interested in edible or biodegradable biopolymer packaging as a non-toxic and biodegradable substitute for organically derived polymers [4]. Thin coatings of food-derived compounds called edible films act as a barrier to keep out gases, moisture, and solutes in meals [5]. In addition to providing passive protection, edible food packaging can also be used to bioactively carry substances that are critical to human health [6]. A new type of edible food packaging has emerged in recent years, incorporating functional elements that may improve consumers' health [7]. Curcumin is regarded as a nontoxic and edible substitute [8]. This material has the ability to prolong shelf life and can be used to track the freshness of food items [9].

The primary ingredient in turmeric, curcumin, may find use in a number of conventional medications as well as in packaging [10]. The packaging industry is increasingly using this bioagent, which is mostly produced in India, because of its non-toxic nature, film-forming capabilities, and UV barrier qualities [11]. Curcumin is a very sensitive substance that can be used as an indication in smart packaging, since it becomes yellow at neutral and acidic pH values between 1 and 7 and red at alkaline pH values above 8.5 [12]. The creation of composite films using curcumin in food packaging is intriguing since it offers extra functional qualities including enhanced mechanical strength, UV protection, antioxidant qualities, and antibacterial activity [13]. As a result, adding curcumin to packaging methods enhances food safety and enables consumers to quickly check the freshness of food without the need for complex equipment.

Curcumin has emerged as a lucrative option for the production of active compounds in this context [10]. Nevertheless, there are numerous restrictions on curcumin's ability to reinforce food packaging. Curcumin's intrinsic hydrophobicity makes it challenging to disperse in a hydrophilic film matrix [14]. However, curcumin's low environmental stability means that it can degrade when exposed to heat and light, which will reduce the final food packaging activity [12]. Encapsulation techniques have emerged as a successful means of getting around these restrictions in recent years. The technique of adding curcumin to other substances, such as niosomes, liposomes, or nanoparticles, is known as curcumin encapsulation [15]. Curcumin's stability, bioavailability, and activity may all be improved by this encapsulation [16]. In this instance, encapsulated curcumin is utilized as an active ingredient in the packaging to extend the product's shelf life and offer further protection or health advantages [17].

An inventive method for creating edible packaging is the use of curcumin as an active ingredient, particularly in the food or pharmaceutical sectors [18]. This review article's goal is to investigate curcumin's potential as a natural ingredient for the creation of active edible packaging, particularly in light of food safety, health effects, and environmental sustainability. Curcumin may offer a more secure and efficient substitute for artificial chemicals.

## 2. Objects and methods

### *2.1. Literature search*

This review was conducted following a structured approach to ensure comprehensive coverage and relevance of the literature. A systematic literature search was performed using major databases including PubMed, Scopus, Web of Science, and Google Scholar. The search terms used were: “curcumin bioavailability,” “nanotechnology curcumin,” “curcumin health benefits,” “curcumin delivery systems,” “curcumin in food packaging,” and combinations thereof.

### *2.2. Criteria for inclusion or exclusion*

The inclusion criteria were: Articles published in English between 2000 and 2025; Peer-reviewed original research articles, reviews, and book chapters; and Studies focusing on curcumin's bioavailability enhancement, health benefits, delivery systems, and application in food packaging. Exclusion criteria included: Non-English publications; Studies not related to curcumin or its bioavailability; and Conference abstracts without full papers.

### *2.3. Data sources and geographic information*

In total, 98 articles were included after screening more than 300 initial titles and abstracts. Data were extracted based on study design, formulation strategies, observed effects, and relevance to curcumin’s use in food or biomedical applications. Geographic origin of the studies was noted but not restricted, with a focus on globally representative research.

### *2.4. Research subjects and analysis techniques*

The selected literature was then categorized thematically into four main sections: (1) Curcumin’s bioavailability issues and enhancement strategies, (2) Health-promoting properties of curcumin, (3) Curcumin nanoformulations and delivery systems, and (4) Innovative applications in food packaging. A qualitative synthesis was performed to identify trends, research gaps, and technological advancements.

## 3. General information

### *3.1. Characteristics*

Curcumin (diferuloylmethane), a brilliant orange-yellow polyphenolic compound with the chemical formula $C_{21}H_{20}O_6$ [10], was extracted from

the root of *Curcuma longa*, a member of the Ginger / Zingiberaceae family (Figure 1). This root is abundantly grown in Southeast Asia, China, and India [19]. Curcumin's polyphenolic characteristics allow it to modify some signal transmission paths, resulting in a wide range of antibacterial, anticarcinogenic, antioxidant, and nerve effects [20]. Due to its antioxidant and antibacterial qualities that extend the shelf life of products, curcumin is utilized as a bioagent, and is typically coupled with various polymer and nanoparticle systems that find numerous applications in the food packaging sector [18]. However, the compound has not received approval as a medicinal agent because of its limited bioavailability. The complex's limited bioavailability can be attributed to its insolubility in water, poor absorption, fast metabolism within cells, and instability at physiological pH [21]. According to reports, curcumin is safe and has few negative effects in addition to its many health advantages [22]. The antioxidant effectiveness of individual curcuminoids was tested using in vitro model systems such as linoleic acid peroxidation [23]. Curcumin had the best antioxidant activity among the three curcuminoids: demethoxycurcumin, bisdemethoxycurcumin, and curcumin.

### *3.2. Chemistry*

Diferuloymethane is the chemical name for curcumin, which is also referred to as natural yellow because of its distinctive yellow hue, which makes it a valuable coloring additive for food, cosmetics, textiles, and medications [24]. These polyphenols comprise roughly 2–5 % of turmeric's makeup. Vogel discovered curcumin in 1815, and Daybe crystallized it to determine that it was 1,7-bis(4-hydroxy-3-methoxyphenyl)-1,6-heptadiene-3,5-dione [25]. The feruloyl methane skeleton of curcumin was thoroughly characterized by Lampe and Milobedzka in 1910 [26]. Curcumin is an orange-yellow crystalline powder with a molecular weight of 368.37 g/mol and a melting point of around 183 °C [27]. It is made up of two phenolic rings. It is mainly soluble in organic solvents but has poor solubility in water [28]. The rhizome of *Curcuma longa* is isolated to produce curcumin. The pure form of curcumin [1,7-bis(4-hydroxy-3-methoxyphenyl)-1,6-heptadiene-3,5-dione] is not commercially available due to the high expense and complexity of the process [29]. Instead, it is made up of curcuminoids that are found in nature, namely curcumin I, II, and III: 75–81 % curcumin I, 15–19 % curcumin II (demethoxycurcumin), and 2.2–6.6 % curcumin III (bisdemethoxycurcumin) as the majority of its composition [9] (Figure 2).

### *3.3. Cultivation*

The turmeric plant, or *Curcuma longa*, is grown in several nations, including China, Peru, India, Haiti, Jamaica, and Indonesia [8]. The amount of space used for cultivation and the application of chemical fertilizers, particularly nitrogen and potassium, help boost curcumin levels and vegetative development, respectively, but they also have an impact on the production and quality of the turmeric that is produced [30]. In order to grow well, it needs warm, humid weather and prefers wet, well-drained, non-loamy soil [31]. Dried rhizomes provide an extract that is higher in curcuminoid but lower in oleoresin than fresh rhizomes [32]. It is easier to use dried rhizomes because of their low water content, which protects them against microbial invasion [33]. This spice should be harvested only after the stems and leaves begin to dry up and turn brown, which takes more than seven months [34].

### *3.4. Extraction*

To make yellow turmeric, the rhizomes are dried, cooked, and pounded into a powder before being cleaned with an appropriate solvent [33]. The active curcuminoids are separated by extraction, which yields an oleoresin that contains essential oil, resin, and 2–8 % curcuminoids [35]. Since curcuminoids are insoluble in water, they are often separated using highly soluble organic solvents including methanol, ethanol, and acetone [36]. However, some restrictions dictate that only suitable solvents, including ethanol and isopropyl alcohol, must be used when turmeric extracts and curcuminoids are to be employed in food and medication [37]. As shown in the flow diagram (Figure 3), there are several different extraction techniques that can be applied, including hydrotrophic extraction, Soxhlet extraction, low-pressure solvent extraction, supercritical fluid-based extraction, and microwave-assisted extraction.

Traditional solvent extraction techniques like Soxhlet and low-pressure solvent extraction yield significant amounts of curcuminoid when high solvent-to-raw-material ratios are employed [35]. A higher solvent flow rate restricts the process overall, resulting in a lower yield. The employment of clean technology in supercritical fluid-based extraction is known to save time and solvent usage, but it may have disadvantages because of its high operating pressure system [38]. In comparison, supercritical fluid-based extraction recovered over 90 % of curcuminoids and produced the highest curcumin yield [39].

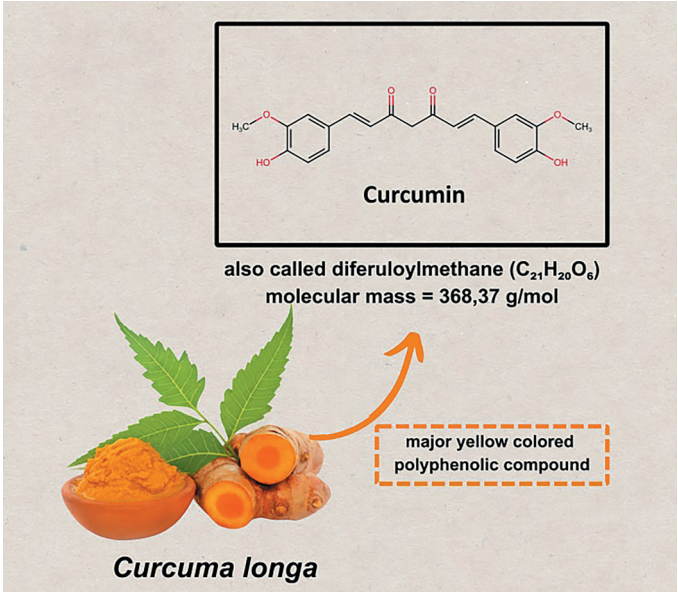



Figure 1. **Chemical structure and appearance of curcumin**
Рисунок 1. **Химическая структура и внешний вид куркумина**

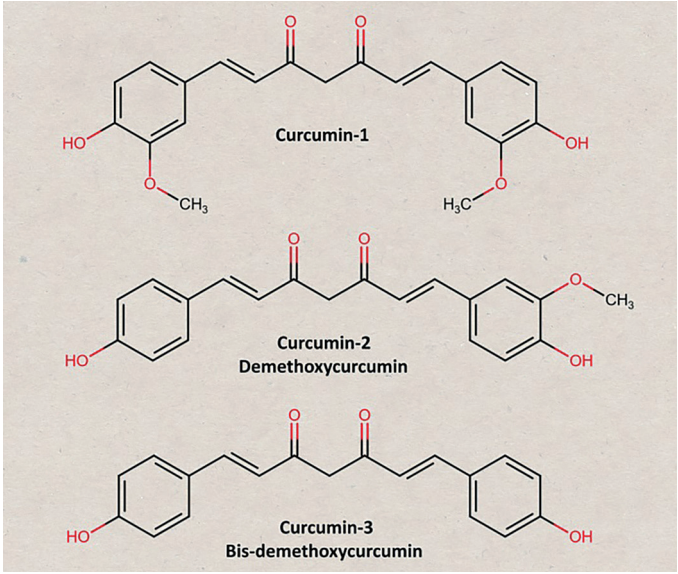



Figure 2. **Curcumin structure**
Рисунок 2. **Структура куркумина**

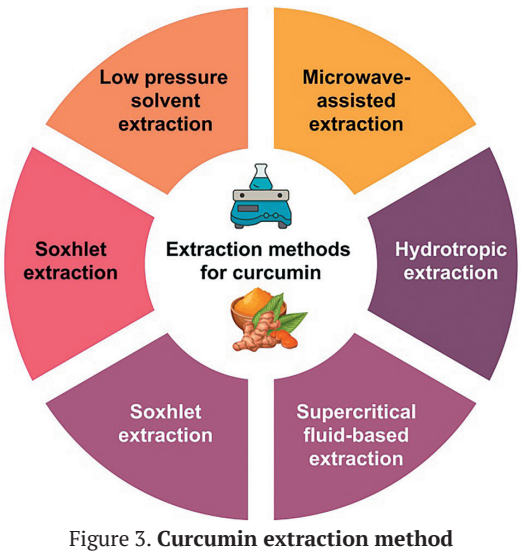



Figure 3. **Curcumin extraction method**
Рисунок 3. **Методы экстракции куркумина**

Organic-solvent-free hydrotrophic process. Hydrotropes and water-soluble organic salts are used in this procedure [40]. Hydrotropes increase the availability of curcuminoids by penetrating the cell walls of turmeric plants and speeding up the dissolution process [41]. Later addition of water results in the precipitation of curcuminoids [42]. Results from this straightforward technique are equivalent to those from other extraction techniques in terms of purity. The turmeric powder and the extraction solvent are heated concurrently using microwave radiation in a dual heating method used in microwave-assisted extraction [43]. Under ideal circumstances, this technique produces higher yields in less time than other conventional extraction techniques.

*3.5. Synthesis*

Curcumin is made synthetically by starting with vanillin and acetylacetone/B2O3 at room temperature with tributan-2-yl borate and butylamine, and then using ethyl acetate as the solvent [44]. This process yields roughly 80% (Figure 4). Another method for creating curcumin is the Pabon method, which involves condensing acetylacetone and vanillin. The identity of the resultant synthetic compound can be ascertained by comparing its melting point, the melting point of the mixture, and its infrared spectrum to those of the original sample [45]. Over 99.5% curcumin was detected using the rosocyanine technique [46]. Every other chemical utilized in this process is of analytical grade.

*3.6. Stability*

Curcumin, a bis-α, β-unsaturated β-diketone compound, exists in equilibrium with its enol tautomeric form under various pH conditions [47]. In acidic to neutral environments, the bis-keto form is predominant, whereas at alkaline pH levels (above pH 8), the enol form of the heptadienone chain becomes dominant [48]. Within the pH range of 1 to 7, curcumin typically exhibits a yellow hue, but it undergoes a visible color shift to reddish-orange as the pH exceeds 7.5 (Figure 5). This pH-sensitive color transition, particularly in alkaline conditions, underscores the chemical instability of curcumin and presents a limitation for its use as a colorant in products exposed to basic environments [10]. Empirical data indicate that curcumin is highly unstable between pH 7 and 10, making it more suitable for applications maintained below pH 7. Specifically, in the pH range of 3 to 7, the keto tautomer predominates, while the enol form becomes more prevalent at pH levels above 8 [49].

Curcumin's tautomeric forms, keto and enol, are primarily responsible for its antioxidant activity and phytochemical behavior under physiological settings. These forms engage in free radical scavenging through methods of electron transfer and hydrogen atom donation [50]. Among these, the enol tautomer demonstrates greater thermodynamic stability, primarily due to robust intramolecular hydrogen bonding [51].

Curcumin is also sensitive to photodegradation when exposed to ultraviolet (UV) and visible light, both in solution and in solid-state forms. The degradation rate is significantly accelerated in the presence of light and atmospheric oxygen [47]. It has a high absorbance in the UV-visible range, with peak absorption usually seen between 408 and 430 nm, with polar liquids showing the highest absorption around 420 nm [52]. Experimental findings have shown that curcumin's stability declines rapidly in neutral to alkaline pH conditions, especially between pH 3 and 7, suggesting enhanced decomposition in such environments [53]. Its photoinstability is further exacerbated by self-sensitized photooxidation, as curcumin acts as a singlet oxygen photosensitizer. Therefore, to minimize photodegradation, curcumin should be protected from direct sunlight and oxygen exposure [54].

Moreover, the photochemical behavior and spectral characteristics of curcumin are highly dependent on the nature of the solvent. In biological systems, curcumin's phototoxic potential may be influenced by reactive oxygen species such as singlet oxygen and superoxide, as well as by products generated from photodecomposition processes [55].

*3.7. Degradation*

Turmeric contains three principal diarylheptanoids: curcumin, demethoxycurcumin (DMC), and bisdemethoxycurcumin (bisDMC). A study investigating the photodegradation quantum yields of curcumin and bisDMC in polar solvents such as acetonitrile and methanol revealed that both compounds exhibited a single exponential decay pattern in media with weak hydrogen bonding interactions [56]. Notably, bisDMC demonstrated a lower quantum yield and underwent faster degradation compared to curcumin under these conditions [57]. Conversely, in solvents exhibiting strong hydrogen bonding capacity, bisDMC displayed slower photodegradation and a higher quantum yield, suggesting that the polarity and hydrogen bonding environment significantly influence the rate of decay of their excited singlet states [58]. In nonpolar solvents, bisDMC decayed more slowly than curcumin via mechanisms such as excited-state intramolecular proton transfer and reketonization; however, negligible deactivation was observed when intermolecular charge or energy transfer occurred in environments with strong hydrogen bonding [59]. Despite its structural differences, bisDMC underwent more extensive photodecomposition under identical conditions than curcumin, indicating that increased photostability in curcumin is not solely attributable to the presence or absence of methoxy groups [56].

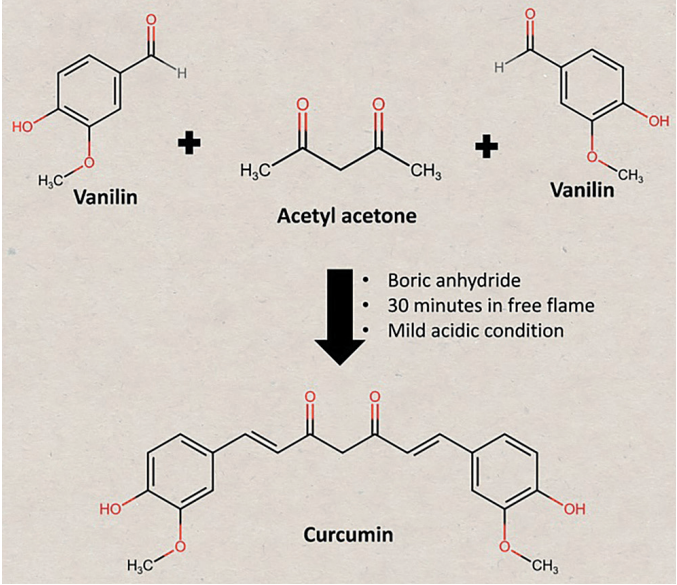



Figure 4. **Synthesis of curcumin**
Рисунок 4. **Синтез куркумина**

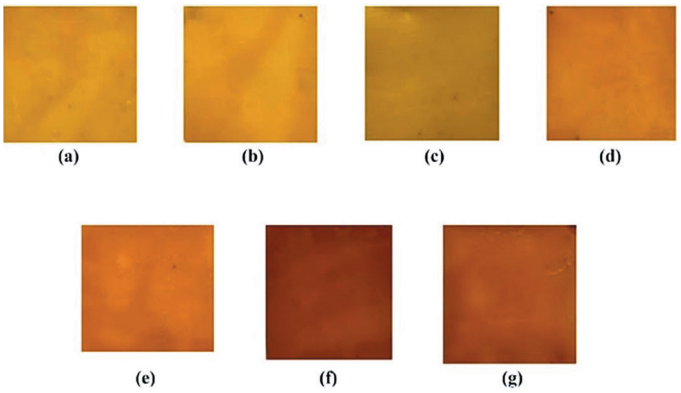



Figure 5. **Color changes of tapioca starch/curcumin films at pH values a 5, b 6, c 7, d 8, e 9, f 10 and g 11**
Рисунок 5. **Изменение цвета пленок из тапиокового крахмала/куркумина при значениях pH: a) 5, b) 6, c) 7, d) 8, e) 9, f) 10 и g) 11**

Curcumin's thermal instability presents additional challenges, especially in culinary applications. Thermal processing, such as roasting and baking, induces various chemical transformations that can reduce its biological efficacy [10,26]. For example, roasting curcumin caused it to degrade significantly; after five minutes, just 30% of the original component was left, and 4-vinyl guaiacol was the predominant breakdown product. Ferulic acid was created quickly in the first degradation phase, then converted more slowly to 4-vinyl guaiacol and finally to volatile phenolic compounds such as isoeugenol, guaiacol, and vanillin, despite the fact that it did not accumulate in significant quantities [60]. Minor traces of vanillin were detected. Interestingly, roasted curcumin applied to RAW264.7 macrophage cells at a concentration of 20 μM did not exhibit cytotoxic effects. Curcumin is highly sensitive to thermal and pH changes, with its dicarbonyl moieties and the central carbon in the heptanoid chain being the most susceptible to degradation [61]. Decomposition involves oxidative cleavage followed by decarboxylation, especially under exposure to heat and oxygen [62]. Experimental data indicate that heating at 180 °C for 50 minutes produced the highest concentration of 4-vinyl guaiacol, which subsequently decreased upon extended roasting due to conversion to diketene derivatives [60]. These findings highlight the critical importance of fine-tuning processing conditions to preserve the functional properties of curcumin and other bioactive plant compounds [63].

*3.8. Solubility*

The primary cause of curcumin's reduced bioavailability is its water-insoluble nature. Its bioavailability is increased via solid encapsulation and dispersion methods, as well as micro and nano curcumin solutions [16]. Nonetheless, the bioagent has good solubility in organic solvents such as acetone, 2-propanol, ethanol, methanol, dimethoxy sulfoxide (DMSO), and chloroform [28]. The natural substance curcumin may become at least 104 times more soluble in water at pH 5 if a cyclodextrin complex is formed from it [64]. This compound also demonstrates greater hydrolytic stability under alkaline circumstances but produces an increased rate of photodecomposition, relative to curcumin solutions in organic solvents [65]. The degradation rate and stability constant for curcumin complexation are influenced by the cyclodextrin's elasticity, cavity size, and side chain charge [66].

## 4. Health benefits

Following ingestion, curcumin is predominantly metabolized in the gastrointestinal tract, liver, and colon, with the gut microbiota playing a significant role in its biotransformation [67]. This metabolic process occurs in two distinct phases, both enzymatically driven. In the initial phase, reductase enzymes in intestinal and hepatic cells catalyze the hydrogenation of the heptadiene-3,5-dione moiety, sequentially producing dihydrocurcumin, tetrahydrocurcumin, hexahydrocurcumin, and octahydrocurcumin [36]. The subsequent phase involves conjugation reactions mediated by glucuronidase and sulfotransferase enzymes, which attach glucuronic acid and sulfate groups to the phenolic hydroxyl groups of curcumin and its reduced metabolites. This results in the formation of glucuronide and O-sulfate conjugates, which represent the primary circulating metabolites of curcumin in vivo [68]. A wide array of clinical studies has substantiated curcumin's broad-spectrum bioactivity, including its antimicrobial, antidepressant, anticancer, and antioxidant properties [69].

*4.1. Antioxidant properties*

Curcumin has been shown to mitigate mitochondrial oxidative stress by enhancing the enzymatic activities of endogenous antioxidants such as glutathione, catalase, and superoxide dismutase [70]. Its molecular structure contains three redox-active sites that can undergo hydrogen atom abstraction and oxidation, resulting in the formation of phenoxy radicals that stabilize its enol form through resonance mechanisms [37]. A daily dose of 645 mg of curcumin over 67 days significantly boosted total antioxidant capacity and decreased malondialdehyde (MDA) levels, indicating reduced lipid peroxidation, according to a meta-analysis of 308 participants, 60 % of whom were female [71].

An in vivo investigation further explored curcumin's hepatoprotective and cardioprotective effects against doxorubicin (DOX), a chemotherapeutic agent known for its adverse hepatic and cardiac effects. In this study, rats were administered a single intraperitoneal dose of DOX (20 mg/kg) to induce toxicity, while curcumin (100 mg/kg orally) was given for ten days before and five days following DOX administration. The protective effects of curcumin were attributed to its anti-inflammatory and antioxidant mechanisms, which include the suppression of lipid peroxidation, downregulation of nuclear factor-kappa B (NF-κB), inhibition of inducible nitric oxide synthase (iNOS) and tumor necrosis factor-alpha (TNF-α), as well as reduction in circulating interferon-gamma (IFN-γ) levels. These findings support the potential role of curcumin as an adjuvant therapy to attenuate DOX-induced hepatotoxicity and cardiotoxicity through antioxidant-based pathways [72].

*4.2. Antibacterial properties*

The antimicrobial potential of curcumin was first documented by Schraufstatter and colleagues in 1949, marking an early recognition of its bioactive properties [73]. Despite inherent limitations such as low aqueous solubility, poor pharmacokinetics, and limited systemic bioavailability, contemporary studies have consistently highlighted curcumin's potent antibacterial activity [74]. Its antimicrobial mechanisms involve disruption of bacterial cell membranes, interference with intracellular processes through interaction with key proteins and nucleic acids, and inhibition of quorum sensing pathways essential for bacterial communication and virulence [75].

A study conducted by Dizaj et al. [76] investigated the antibacterial efficacy of curcumin nanocrystals against *Porphyromonas gingivalis*, a pathogen isolated from gingival crevicular fluid of Iranian patients experiencing dental implant failure. The research employed the broth microdilution technique to determine the minimum inhibitory concentration (MIC) and utilized the disc diffusion assay to evaluate bacterial susceptibility. Curcumin nanocrystals produced the largest inhibition zone at a concentration of 50 µg/mL. Furthermore, the MIC assay demonstrated bacterial growth inhibition at 6.25 µg/mL, while the minimum bactericidal concentration (MBC) was established at 12.5 µg/mL, confirming the nanoparticles' bactericidal potential against *P. gingivalis* [76].

*4.3. Anti-diabetic properties*

Research involving diabetic subjects has demonstrated that curcuminoids may positively influence glucose metabolism by enhancing insulin sensitivity and reducing circulating levels of pro-inflammatory cytokines such as leptin, resistin, interleukin (IL)-6, IL-1β, and tumor necrosis factor-α (TNF-α). In addition, curcuminoids have been shown to elevate adiponectin secretion while lowering both insulin and blood glucose levels, thereby contributing to improved glucose homeostasis and glycemic control in diabetes management [77].

In a related preclinical investigation, the synergistic effect of regular physical exercise combined with a curcumin-enriched diet (5 g/kg) was assessed in male Long-Evans Tokushima Fatty Otsuka rats and Long-Evans Tokushima Otsuka (LETO) control rats. The intervention resulted in improved glucose homeostasis, more favorable lipid profiles, body weight reduction, and a marked decrease in endoplasmic reticulum (ER) stress markers as well as inflammatory mediators such as IL-6, TNF-α, and IL-10. Furthermore, cognitive performance assessed via the Morris water maze test showed that curcumin supplementation enhanced escape latency and memory retention, indicating neuroprotective effects [78].

Another experimental study evaluated the inhibitory effects of curcumin on alpha-amylase activity in rats administered doses of 10, 20, 40, and 80 mg/kg over 30 days. Blood glucose levels were monitored every three days, while insulin levels were assessed at the beginning, midpoint, and conclusion of the study. Results indicated that curcumin significantly reduced glucose and insulin concentrations and effectively inhibited alpha-amylase, with an $IC_{50}$ of 51.32 µM and a Ki value of 20.17 µM [79].

Additionally, curcumin has been reported to activate 5′-adenosine monophosphate-activated protein kinase (AMPK), a metabolic regulator that shifts energy metabolism from lipogenesis to fatty acid oxidation, thereby decreasing hepatic glucose production and enhancing glucose uptake in muscle tissue. In gestational diabetic rat models, curcumin administration activated AMPK and modulated hepatic oxidative stress by altering levels of thiobarbituric acid reactive substances (TBARS), superoxide dismutase (SOD), glutathione, and catalase [80].

*4.4. Antidepressant properties*

Emerging evidence suggests that depression is strongly associated with dysregulation of the brain-gut axis and imbalances in the gut microbiota composition [81]. The integrity of the gut barrier may be compromised by changes in intestinal microbial populations, which could result in increased permeability. This could then impact neurotransmitter signaling and lower levels of brain-derived neurotrophic factor (BDNF), which are thought to be the mechanisms underlying depressed symptoms [82]. Given that the gastrointestinal tract and liver are the main sites of curcumin metabolism, it is proposed that curcumin exerts neuroprotective effects by modulating gut microbiota and reducing intestinal inflammation, thereby influencing brain function through the gut-brain axis [83].

Curcumin's potential efficacy in treating major depressive disorder (MDD) is supported by several biological mechanisms, including enhancement of hippocampal neurogenesis, inhibition of monoamine oxidase (MAO) activity, modulation of key neurotransmitters such as serotonin, dopamine, and norepinephrine, as well as its anti-inflammatory properties [84]. In a 12-week randomized, double-blind, placebo-controlled clinical trial, Kanchanatawan et al. [85] evaluated the adjunctive benefits of curcumin in 65 patients with MDD. Participants were randomly assigned to receive curcumin supplementation or a placebo. Results indicated significant improvements in depressive symptoms, as measured by the Montgomery-Åsberg Depression Rating Scale (MADRS), beginning at week 12 and persisting four weeks post-treatment. Notably, curcumin demonstrated superior efficacy compared to placebo in alleviating symptoms of depression, with statistically significant group differences observed at weeks 12 and 16. Furthermore, the antidepressant effects of curcumin appeared to be more pronounced in male participants.

*4.5. Anticancer properties*

Conventional therapeutic modalities for cancer, including surgery, chemotherapy, radiotherapy, and immunotherapy, aim to either eradicate malignancies or delay disease progression. However, these approaches often present limitations in efficacy and are frequently accompanied by significant adverse effects [86,87]. Curcumin, a natural polyphenol, has been extensively studied for its anticancer potential due to its ability to modulate multiple intracellular signaling pathways. These include STAT3, NF-κB, early growth response protein 1 (Egr-1), activator protein-1 (AP-1), P53, Wnt/β-catenin, PI3K/Akt, JAK/STAT, and MAPK cascades [88,89].

In an in vitro investigation, Li et al. [90] assessed curcumin's therapeutic potential in colorectal cancer. The results revealed that curcumin selectively inhibited the proliferation of colon cancer cells without cytotoxic effects on normal colonic epithelial cells. It upregulated the pro-apoptotic protein Bax and induced apoptosis through P53-dependent mechanisms. Furthermore, curcumin was shown to impede cell cycle progression at the S phase by suppressing Rb protein phosphorylation, decreasing the synthesis of cell cycle-regulatory proteins, and downregulating E2F family transcription factors.

Similarly, Kamalabadi et al. [91] evaluated the anticancer effects of curcumin on breast cancer using three-dimensional (3D) multicellular spheroids, a model that better preserves the physiological properties of tumors compared to traditional two-dimensional (2D) cultures. Their findings indicated that curcumin exerted cytotoxic effects on MCF-3 breast cancer cells in both 2D and 3D systems in a dose- and time-dependent manner. Despite curcumin's low bioavailability, these results highlight its significant antiproliferative activity in in vitro tumor models.

## 5. Functional edible films: A new concept in food packaging

Food packaging serves a number of purposes, such as informational, marketing, and confinement [92]. Traditional food packaging serves the primary purposes of keeping food isolated from its surroundings, minimizing changes to the food, ensuring greater stability, reducing interaction with spoilage factors (such as light, oxygen, water vapor, microorganisms, etc.), and ultimately extending the food's shelf life while in storage [93].

Edible film is a type of primary packaging that is applied to food and is formed of edible ingredients that have been solidly laminated [94]. Edible films, which have no nutritional, functional, or sensory value, have been created for uses such as wrapping food items and serving as a protective covering [95]. On the other hand, films with these qualities might be preferred for uses like the principal packaging of breakfast cereals or the packing of items that are ready to eat, such as sushi, sandwiches, and frozen pizza [96].

The primary biopolymers utilized in the creation of edible films include proteins, polysaccharides, lipids, and mixtures of these substances [97]. Proteins and polysaccharides have drawn increased attention due to their unique qualities, which include their relative abundance, nutritional value, and capacity to produce good film layers [98]. Edible film coatings are often made from polysaccharides such as locust bean gum, agar, xanthan, carrageenan, guar, pectin, and alginate [99]. The most researched proteins for the creation of edible film coatings for foods are zein, gelatin, casein, whey protein, and soy protein [100]. Although the majority of lipid compounds cannot form film layers on their own, some oils and waxes, such as palm oil and carnauba wax, can be combined with hydrocolloids to generate composite layers that have better moisture resistance since lipids are hydrophobic [101].

In addition to the sustainability that biopolymer films are projected to provide, edible functional films with bioactive qualities are made for consumers who are concerned about health and nutrition (Figure 6). In addition to being edible, this packaging contains bioactive ingredients like flavonoids, marine oils, probiotics, and prebiotics that may improve consumers' health [7]. One novel technique that is currently gaining traction is edible functional films, which are a creative take on the idea of functional meals in relation to a sustainable approach [102].

Functional edible films have garnered attention for their ability to facilitate the controlled delivery of bioactive compounds through the human gastrointestinal (GI) tract, particularly targeting the intestinal region where these substances can adhere to the epithelial mucosa and subsequently enter the lymphatic circulation [103]. To achieve this, it is essential that the encapsulated bioactives remain stable and are not prematurely degraded or released in the upper GI tract, where absorption is typically inefficient or negligible [104]. These films must therefore be engineered to resist variations in pH and enzymatic digestion throughout the GI system.

The effectiveness of these films is closely linked to the physicochemical interactions between the biopolymer matrix and the embedded bioactive agents. The specific type of polymer utilized in the formulation plays a critical role in determining the release kinetics and overall concentration of the bioactive compounds in the target environment. Thus, the release profile of the functional "payload" must be precisely characterized and optimized [105].

In scholarly literature, the term "bioactive film" is predominantly used to describe edible films that incorporate health-promoting bioactive constituents [7]. However, in some contexts, the term has also been applied to films designed to impart beneficial properties to food products, such as antioxidant or antimicrobial effects [106–108]. In light of this ambiguity, it is proposed that the terminology "functional edible films" be adopted to more accurately describe edible films specifically developed to enhance human health outcomes.

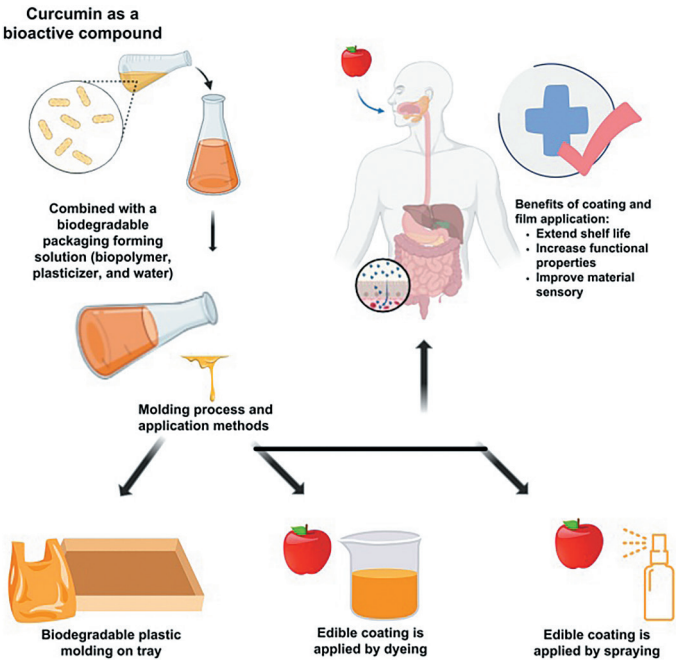



Figure 6. **An overview of functional edible films and their actions**
Рисунок 6. **Обзор функциональных съедобных пленок и их свойств**

## 6. Curcumin: A bioactive molecule with potential for edible bioactive film production

Bioactive compounds, a class of phytochemicals extractable from food or food-derived waste, are recognized for their capacity to support health and influence metabolic pathways [109]. Among them, curcumin, a principal component derived from the rhizome of *Curcuma longa* of the Zingiberaceae family, exhibits a symmetrical molecular structure characterized by a β-diketone enol form and two ortho-methoxyphenolic rings joined by a heptacarbon chain [37,110]. Curcumin is widely acknowledged for its therapeutic potential, notably in the management of conditions such as neurodegenerative diseases, diabetes, metabolic syndrome, cancer, cardiovascular disorders, and arthritis, due to its antioxidant, anti-inflammatory, and antimicrobial properties [111].

The phenolic hydroxyl groups within curcumin's molecular framework play a critical role in neutralizing reactive oxygen and nitrogen species, thus contributing significantly to its antioxidative activity [112]. Additionally, curcumin enhances redox homeostasis by modulating the nuclear factor erythroid 2-related factor 2 (Nrf2), which in turn activates antioxidant response elements and provides cellular defense against oxidative insults, particularly in age-related diseases [113].

In terms of antimicrobial applications, curcumin promotes wound healing, especially among elderly populations, due to its antibacterial properties [114]. It also displays antiviral activity by inhibiting inosine monophosphate dehydrogenase, thereby disrupting nucleotide synthesis crucial to DNA and RNA virus replication [115]. Furthermore, its phenolic constituents regulate inflammation by suppressing transcription factors such as activator protein-1 (AP-1) and nuclear factor kappa B (NF-κB), which are integral to the inflammatory response [116].

The World Health Organization has reported that chronic illnesses, including diabetes, cancer, and cardiovascular diseases, account for approximately 71 % of global mortality [117]. In this context, curcuminoids exert cardioprotective effects through anti-inflammatory mechanisms, oxidative stress modulation, and inhibition of apoptosis [118]. These compounds also attenuate joint inflammation in arthritis by targeting key signaling molecules such as kinases [119], and their anti-obesity potential is mediated through regulation of oxidative balance and anti-inflammatory enzyme expression [120]. A clinical study demonstrated that six weeks of supplementation with 1 g/day of curcumin in its phospholipidated form significantly improved zinc-to-copper ratios and plasma zinc levels in patients with metabolic syndrome being two indicators of enhanced antioxidant defense [121].

Curcumin's antidiabetic properties have been extensively studied, with mechanisms linked to the regulation of glucose metabolism and insulin

secretion [122]. In diabetic rats, administration of curcumin-enriched yogurt improved lipid profiles (triacylglycerol and total cholesterol reduced by 61 % and 21 %, respectively) and carbohydrate metabolism biomarkers (63 % reduction), while increasing paraoxonase activity by 31 % compared to controls [123]. Similarly, a 12-week trial involving 60 women with polycystic ovary syndrome revealed that 500 mg/day of curcumin improved insulin sensitivity, reduced body weight, serum lipid levels (triglycerides decreased from 163.6 ± 44.8 to 154.0 ± 29.4 mg/dL), and glycemic markers (fasting insulin decreased from 111.3 ± 3.6 to 10.1 ± 3.2 μIU/mL) [124].

In oncology, curcumin impedes cancer progression through anti-angiogenic and anti-lymphangiogenic effects, regulation of tumor suppressor proteins (e. g., p53), and inhibition of cancer cell proliferation, apoptosis, and invasion [125]. Furthermore, curcuminoids are especially useful because of their capacity to regulate neuroinflammation, oxidative stress, neurotransmitter synthesis (including dopamine and serotonin), and mitochondrial stability. This is especially important given the reciprocal relationship between mental illness and chronic diseases, where one may raise the risk of the other [113,126].

Although curcumin has gained considerable attention as a bioactive food ingredient or nutraceutical, its clinical utility is hampered by poor water solubility, chemical instability, and low systemic bioavailability, which contribute to its suboptimal pharmacokinetic profile [41]. Effective therapeutic outcomes often necessitate high dosages, which is a limitation when using turmeric extracts in food systems [9]. This limited bioavailability is attributed to several physicochemical and physiological factors, such as low aqueous solubility, limited permeability in the gastrointestinal tract, instability at physiological pH, and extensive first-pass metabolism in both the liver and intestines [127].

## 7. Encapsulation of curcumin for application as a bioactive agent

The limitations associated with curcumin utilization, such as its low solubility and bioavailability, may be effectively addressed through encapsulation within food-grade biopolymers or colloidal delivery systems [12]. Encapsulation techniques enhance the physicochemical stability of curcumin and protect it from enzymatic degradation, hydrolysis, and conjugation-based inactivation, thereby facilitating improved gastrointestinal absorption [128]. Various delivery platforms have been developed for curcumin, including micelles, emulsions, nanoemulsions, liposomes, microgels, biopolymeric nanoparticles, and molecular complexes (Figure 7).

In an investigation by Zheng et al. [129], the type of curcumin delivery system was found to significantly influence its gastrointestinal bioaccessibility. Nanocrystals had the lowest bioaccessibility among the investigated systems (nanoemulsions, soy milk, and nanocrystals) because of their restricted micelle-mediated solubilization. In contrast, Peng et al. [130] demonstrated that the encapsulation of curcumin in sophorolipid-coated nanoparticles led to a 2.7–3.6-fold increase in bioavailability in both in vitro and in vivo settings compared to unencapsulated curcumin.

Liu et al. [131] reported that curcumin encapsulated within amphiphilic starch-based micelles exhibited a controlled release profile, with approximately 55 % release sustained over a 7-hour intestinal simulation. Furthermore, Gómez-Mascaraque et al. [132] enhanced curcumin bioaccessibility by 1.7-fold using hybrid nanostructures composed of phosphatidylcholine liposomes embedded in an electrospray wood-polymer composite matrix.

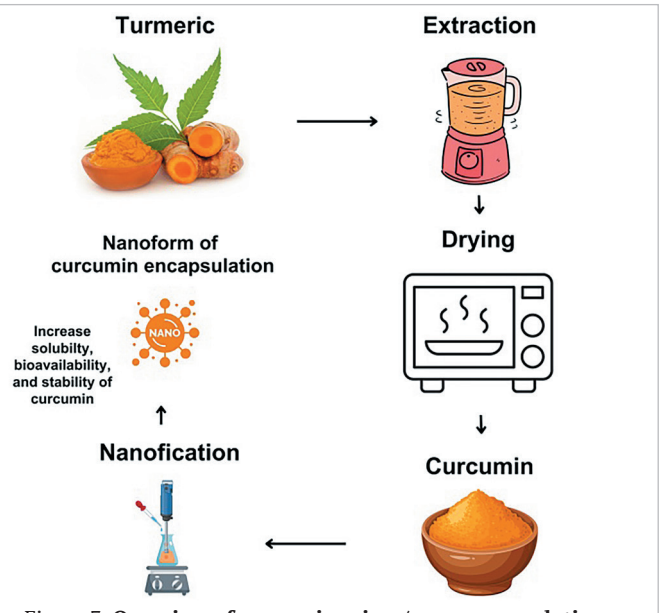



Figure 7. **Overview of curcumin micro/nanoencapsulation**
Рисунок 7. **Обзор микро-/нано-инкапсуляции куркумина**

Emulsion-based systems have emerged as efficient carriers for curcumin due to their ability to solubilize lipophilic compounds and improve both chemical stability and absorption [133]. Aditya et al. [134] found that curcumin encapsulated in a water-in-oil-in-water double emulsion exhibited significantly greater bioaccessibility (72 %) compared to its free form (16 %). Similarly, nanoemulsions fabricated via conventional oil-loading, heat-driven, and pH-driven approaches yielded comparable bioaccessibility values ranging from 74 % to 79 %, approximately 7–8 times higher than curcumin in aqueous solution [129]. These findings suggest that lipid-based encapsulation may substantially enhance gastrointestinal uptake of curcumin.

The composition of the carrier lipid also plays a pivotal role in determining curcumin's bioaccessibility. Ahmed et al. [135] observed that emulsions formulated with short-chain triacylglycerols yielded bioaccessibility as low as 1 %, whereas those incorporating medium- and long-chain triglycerides resulted in significantly higher bioaccessibility values of 20 % and 40 %, respectively. Shah et al. [136] further corroborated these results, reporting bioaccessibility of 32 % and 65 % for curcumin-loaded nanoemulsions containing medium- and long-chain triacylglycerols, respectively. Higher total lipid content may promote the formation of mixed micelles capable of solubilizing curcumin; however, excessive lipid quantities could hinder micelle formation if digestion is incomplete, thus limiting the release of curcumin from lipid droplets [137].

An alternative encapsulation approach involves the use of pH-shift-induced colloidal particles, leveraging curcumin's solubility changes based on its pKa. At pH levels ⩾ 12, curcumin becomes protonated and water-soluble, whereas it deprotonates and becomes poorly soluble below pH 8.0. This property allows its incorporation into hydrophobic colloidal interiors [16]. Pan et al. [138] employed this method to encapsulate curcumin in casein-based nanoparticles, which demonstrated enhanced antiproliferative efficacy against pancreatic (BxPC3) and colorectal (HCT-116) cancer cells.

Encapsulation technologies thus represent a promising strategy for improving the functionality of curcumin within edible film matrices intended for food applications. These systems enhance curcumin's protection, stability, and bioaccessibility, thereby maximizing its health-promoting potential [7]. Each encapsulation method offers specific advantages and limitations, and the choice of system must be tailored to the intended food application and target bioactive compounds. As such, encapsulation may serve as a viable means to improve the oral bioavailability of curcumin and similar nutraceuticals when incorporated into functional food products.

## 8. Functional packaging containing curcumin

The incorporation of curcumin as a bioactive component in functional edible films and coatings has garnered increasing attention due to its promising health benefits (Figure 8). Extensive in vitro investigations have revealed that curcumin enhances the antioxidant properties of edible film matrices. For instance, Roy and Rhim [139] reported that integrating 1.5 % (w/w) curcumin into poly(lactic acid)-based films significantly increased antioxidant activity, as determined by DPPH and ABTS assays, from 1.8 % and 3.1 % to 76.6 % and 94.7 %, respectively. Similarly, Xiao et al. [140] demonstrated improvements in antioxidant capacity by approximately 25–35 % and 10–20 % in films composed of cellulose nanocrystals and soy protein isolate using DPPH and ABTS methods. Roy and Rhim et al. [141] also showed that curcumin (1 % w/w) in zinc oxide–carboxymethylcellulose composite films markedly enhanced antioxidant activity to 40.2 % and 92.5 % via DPPH and ABTS assays, respectively. These findings serve as preliminary evidence of curcumin's potential to confer health-promoting properties in bioactive food films.

In addition to antioxidant activity, curcumin-containing biopolymeric films have demonstrated antimicrobial efficacy in vitro [142]. Rostami and Esfahani [143] showed that nanocomposite films incorporating *Melissa officinalis* seed gum, curcumin, and montmorillonite exhibited antibacterial activity against *Bacillus subtilis*, *Bacillus cereus*, and *Escherichia coli*. Taghinia et al. [144] also reported that edible films prepared using *Lallemantia iberica* seed mucilage and curcumin inhibited the growth of *Penicillium expansum*, *B. cereus*, *B. subtilis*, and *E. coli*. Furthermore, Manna et al. [145] demonstrated broad-spectrum antimicrobial activity of curcumin-loaded carboxymethylated guar gum films against both Gram-positive and Gram-negative bacteria. Conversely, Musso et al. [146] found that curcumin at 0.02 % (w/v) in gelatin-based films showed no significant antimicrobial effects against *B. cereus*, *Staphylococcus aureus*, *Salmonella enteritidis*, or *E. coli*.

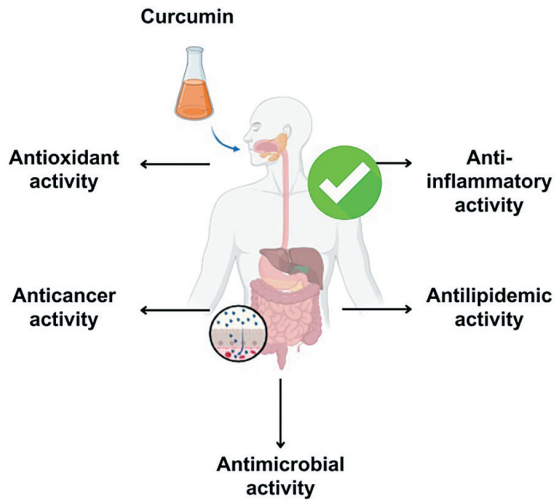



Figure 8. **An overview of the possible beneficial health effects of edible bioactive films containing curcumin**
Рисунок 8. **Обзор возможных полезных свойств съедобных биоактивных пленок, содержащих куркумин**

Despite its bioactive potential, curcumin's clinical efficacy is limited by several physicochemical and biological barriers. The compound suffers from poor water solubility, chemical instability, and rapid metabolism into inactive derivatives, which collectively result in low bioavailability after ingestion [147]. While soluble in lipid environments, curcumin is virtually insoluble in water under acidic or neutral pH at ambient temperature and is prone to rapid degradation in alkaline conditions [12]. Its strong affinity for gastrointestinal mucus further impedes epithelial uptake and increases susceptibility to oxidative and autooxidation degradation [148].

Curcumin-loaded edible films, especially those made with surfactants or emulsifying polymers, have demonstrated the ability to improve their solubility and controlled release in alkaline settings in order to overcome these restrictions [149]. Increasing the concentration of these polymers in aqueous solutions facilitates curcumin solubilization, improving its transport across the intestinal epithelium while minimizing degradation during gastrointestinal transit [66].

The encapsulation of curcumin in edible film matrices offers a viable strategy to mitigate its inherent drawbacks and enhance its in vivo efficacy. Gunathilake et al. [150] found that a composite film made from poly(lactic acid), sodium carboxymethylcellulose, and curcumin facilitated a more efficient release under intestinal pH conditions. In phosphate-buffered saline, carboxymethylcellulose, which becomes soluble and swells in neutral to alkaline media, forms emulsions with curcumin that potentially enhance its permeation through the mucus barrier and absorption by epithelial cells. Conversely, Zhang et al. [151] showed that incorporating curcumin into whey protein microgels slowed its release under simulated gastrointestinal conditions, suggesting that while some biopolymers may offer sustained release, they do not necessarily enhance bioavailability.

Applications of edible bioactive films incorporating curcumin have also been explored in various food matrices. For example, Ghosh et al. [152] demonstrated that nanofiber/chitosan-based coatings enriched with curcumin reduced weight loss, texture degradation, respiration rate, and microbial growth in kiwifruit during storage. Shen et al. [153] reported that chitosan-curcumin nanoparticle coatings effectively suppressed lipid oxidation in pork. Similarly, Bojorges et al. [154] found that edible films based on curcumin and alginate were effective in reducing lipid oxidation in chicken, beef, and pork. Nevertheless, these studies have yet to evaluate the sensory attributes or bioactive efficacy of such films in consumer contexts.

Overall, the biological activity of curcumin supports its role as a promising natural compound for the formulation of functional edible films in food systems. Despite encouraging in vitro results, its application as a delivery system in food matrices remains underexplored, particularly regarding its in vivo bioavailability and sensory impact. Future research should prioritize evaluating the release kinetics, functional efficacy, and consumer acceptance of curcumin-containing bioactive films across various food products [155].

## 9. Commercial prospects of curcumin in food packaging

Curcumin, a naturally occurring polyphenolic compound, has attracted significant interest in recent years owing to its diverse applications and multifunctional properties. Turmeric, the main source of curcumin, has long been used in food and traditional medicine but is now a highly prized commodity, especially in the pharmaceutical industry [10]. This shift has notably influenced the global curcumin market, which was valued at USD52.45 million in 2017 and is projected to reach USD104.19 million by 2025, reflecting a compound annual growth rate (CAGR) of 8.9% [24]. While curcumin continues to be widely used as a functional additive and natural colorant, the pharmaceutical industry remains the primary consumer, followed by the food and beverage sector [8]. Nonetheless, its application in food packaging materials has yet to be realized at a commercial scale.

A notable initiative addressing this gap is the CurCol project, funded under Interreg Northwest Europe, which aims to utilize curcumin as a natural and biodegradable alternative to synthetic dyes for coloring bioplastics and paper packaging [156]. Led by the Avans Foundation and supported by multiple European partners, the project received €1.57 million in funding from the European Union, out of a total research budget of €2.61 million. The project explores the potential of curcumin-based yellow dyes, along with their capacity to produce various hues such as red and blue, while focusing on enhancing the pigment's stability during processing. As a result, commercial interest in curcumin continues to grow, and its future use as a functional additive in food packaging materials appears increasingly likely based on evolving market dynamics.

## 10. Future research perspectives

The potent antioxidant and halochromic properties of curcumin have catalyzed interest in its use in active and intelligent food packaging applications. Despite these promising attributes, several limitations must be addressed before curcumin-based films can be widely adopted. A key challenge is curcumin's poor water solubility, which diminishes its functional efficacy in aqueous environments, such as microbial cells and food matrices that are predominantly water-based [21]. This limitation is a principal factor contributing to the suboptimal antibacterial performance observed in some curcumin-infused films [141]. However, this drawback may be overcome by incorporating curcumin into emulsions before its integration into film-forming systems [114].

The use of emulsification techniques has demonstrated encouraging outcomes for integrating hydrophobic active agents into hydrophilic biopolymer matrices, thereby improving their dispersibility and functional performance [157]. Another obstacle lies in the scalability of curcumin-based materials, as they are not always compatible with standard polymer processing techniques used in industrial production [64]. Curcumin is thermally sensitive, and its molecular structure can degrade at elevated temperatures, thereby restricting its applicability in high-temperature processing environments [158]. Addressing challenges such as the thermal and color stability of pH-responsive films is crucial for the successful processing and commercialization of curcumin-based packaging materials [159].

Future research efforts should prioritize the development of advanced processing methods to improve dye solubility, enhance thermal and color stability, and optimize the manufacturing of active and intelligent packaging films. Furthermore, even at gram-level concentrations, curcumin is safe for human consumption; nonetheless, its use in edible food coatings is still unexplored and needs more research.

## 11. Conclusion

Curcumin, the primary bioactive compound in *Curcuma longa*, exhibits strong potential as an active ingredient in edible food packaging due to its antioxidant, anti-inflammatory, antimicrobial, and anticancer properties. Despite its therapeutic promise, curcumin's poor water solubility, instability under light and heat, and low bioavailability limit its effectiveness in food and biomedical applications. Advances in encapsulation and nano-delivery systems have shown promise in overcoming these limitations, enhancing its functionality and potential for health-promoting applications.

Incorporating curcumin into functional edible films not only supports food preservation and safety but also contributes to environmental sustainability by offering alternatives to plastic-based packaging. These films can also serve as smart packaging indicators due to curcumin's sensitivity to pH and environmental conditions. However, further research is needed to improve its bioavailability in real food systems, ensure consumer acceptance, and address challenges in industrial scalability for commercial use.

## REFERENCES


1. Alamri, M. S., Qasem, A. A. A., Mohamed, A. A., Hussain, S., Ibraheem, M. A., Shamlan, G. et al. (2021). Food packaging's materials: A food safety perspective. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 28(8), 4490–4499. https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2021.04.047
2. Evode, N., Qamar, S. A., Bilal, M., Barceló, D., Iqbal, H. M. N. (2021). Plastic waste and its management strategies for environmental sustainability. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 4(1), Article 100142. https://doi.org/10.1016/j.cscee.2021.100142
3. Bashir, I., Lone, F. A., Bhat, R. A., Mir, S. A., Dar, Z. A., Dar, S. A. (2020). Concerns and threats of contamination on aquatic ecosystems. Chapter in a book: Bioremediation and Biotechnology. Springer Nature Switzerland AG, 2020.
4. Baranwal, J., Barse, B., Fais, A., Delogu, G. L., Kumar, A. (2022). Biopolymer: A sustainable material for food and medical applications. *Polymers*, 14(5), Article 983. https://doi.org/10.3390/polym14050983
5. Díaz-Montes, E., Castro-Muñoz, R. (2021). Edible films and coatings as food-quality preservers: An overview. *Foods*, 10(2), Article 249. https://doi.org/10.3390/foods10020249
6. Vasile, C., Baican, M. (2021). Progresses in food packaging, food quality, and safety-controlled-release antioxidant and/or antimicrobial packaging. *Molecules*, 26(5), Article 1263. https://doi.org/10.3390/molecules26051263
7. Filho, J. G. O., Egea, M. B. (2022). Edible bioactive film with curcumin: A potential "functional" packaging? *International Journal of Molecular Sciences*, 23(10), Article 5638. https://doi.org/10.3390/ijms23105638
8. Fuloria, S., Mehta, J., Chandel, A., Sekar, M., Rani, N. N. I. M., Begum, M. Y. et al. (2022). A comprehensive review on the therapeutic potential of *Curcuma longa* Linn. in relation to its major active constituent curcumin. *Frontiers in Pharmacology*, 13(1), Article 820806. https://doi.org/10.3389/fphar.2022.820806
9. El-Saadony, M. T., Yang, T., Korma, S. A., Sitohy, M., Abd El-Mageed, T. A., Selim, S. et al. (2023). Impacts of turmeric and its principal bioactive curcumin on human health: Pharmaceutical, medicinal, and food applications: A comprehensive review. *Frontiers in Nutrition*, 9(1), Article 1040259. https://doi.org/10.3389/fnut.2022.1040259
10. Sharifi-Rad, J., Rayess, Y. E., Rizk, A. A., Sadaka, C., Zgheib, R., Zam, W. et al. (2020). Turmeric and its major compound curcumin on health: Bioactive effects and safety profiles for food, pharmaceutical, biotechnological and medicinal applications. *Frontiers in Pharmacology*, 11(1), Article 01021. https://doi.org/10.3389/fphar.2020.01021
11. Cvek, M., Paul, U. C., Zia, J., Mancini, G., Sedlarik, V., Athanassiou, A. (2022). Biodegradable films of PLA/PPC and. curcumin as packaging materials and smart indicators of food spoilage. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 14(12), 14654–14667. https://doi.org/10.1021/acsami.2c02181
12. Zheng, B., McClements, D. J. (2020). Formulation of more efficacious curcumin delivery systems using colloid science: Enhanced solubility, stability, and bioavailability. *Molecules*, 25(12), Article 2791. https://doi.org/10.3390/molecules25122791
13. Kaya, E., Kahyaoglu, L. N., Sumnu, G. (2022). Development of curcumin incorporated composite films based on chitin and glucan complexes extracted from *Agaricus bisporus* for active packaging of chicken breast meat. *International Journal of Biological Macromolecules*, 221(1), 536–546. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.09.025
14. Ghoran, S. H., Calcaterra, A., Abbasi, M., Taktaz, F., Nieselt, K., Babaei, E. (2022). Curcumin-based nanoformulations: A promising adjuvant towards cancer treatment. *Molecules*, 27(16), Article 5236. https://doi.org/10.3390/molecules27165236
15. Chen, Y., Lu, Y., Lee, R. J., Xiang, G. (2020). Nano encapsulated curcumin: and its potential for biomedical applications. *International Journal of Nanomedicine*, 15(1), 3099–3120. https://doi.org/10.2147/IJN.S210320
16. Tabanelli, R., Brogi, S., Calderone, V. (2021). Improving curcumin bioavailability: Current strategies and future perspectives. *Pharmaceutics*, 13(10), Article 1715. https://doi.org/10.3390/pharmaceutics13101715
17. Xu, Y., Yan, X., Zheng, H., Li, J., Wu, X., Xu, J. et al. (2024). The application of encapsulation technology in the food industry: Classifications, recent advances, and perspectives. *Food Chemistry: X*, 21(1), Article 101240. https://doi.org/10.1016/j.fochx.2024.101240
18. Roy, S., Priyadarshi, R., Ezati, P., Rhim, J. -W. (2022). Curcumin and its uses in active and smart food packaging applications — A comprehensive review. *Food Chemistry*, 375(1), Article 131885. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.131885
19. Hsu, K. Y., Ho, C. T., Pan, M. H. (2023). The therapeutic potential of curcumin and its related substances in turmeric: From raw material selection to application strategies. *Journal of Food and Drug Analysis*, 31(2), 194–211. https://doi.org/10.38212/2224-6614.3454
20. Islam, M. R., Rauf, A., Akash, S., Trisha, S. I., Nasim, A. H., Akter, M. et al. (2024). Targeted therapies of curcumin focus on its therapeutic benefits in cancers and human health: Molecular signaling pathway-based approaches and future perspectives. *Biomedicine and Pharmacotherapy*, 170(1), Article 116034. https://doi.org/10.1016/j.biopha.2023.116034
21. Sohn, S. I., Priya, A., Balasubramaniam, B., Muthuramalingam, P., Sivasankar, C., Selvaraj, A. et al. (2021). Biomedical applications and bioavailability of curcumin — An updated overview. *Pharmaceutics*, 13(12), Article 2102. https://doi.org/10.3390/pharmaceutics13122102
22. Hewlings, S. J., Kalman, D. S. (2017). Curcumin: A Review of its effects on human health. *Foods*, 6(10), Article 92. https://doi.org/10.3390/foods6100092
23. Ak, T., Gülçin, I. (2008). Antioxidant and radical scavenging properties of curcumin. *Chemico — Biological Interactions*, 174(1), 27–37. https://doi.org/10.1016/j.cbi.2008.05.003
24. Raduly, F. M., Raditoiu, V., Raditoiu, A., Purcar, V. (2021). Curcumin: Modern applications for a versatile additive. *Coatings*, 11(5), Article 519. https://doi.org/10.3390/coatings11050519
25. Oyagbemi, A. A., Saba, A. B., Ibraheem, A. O. (2009). Curcumin: From food spice to cancer prevention. *Asian Pacific Journal of Cancer Prevention*, 10(6), 963–967.
26. Urošević, M., Nikolić, L., Gajić, I., Nikolić, V., Dinić, A., Miljković, V. (2022). Curcumin: Biological activities and modern pharmaceutical forms. *Antibiotics*, 11(2), Article 135. https://doi.org/10.3390/antibiotics11020135
27. Sivani, B. M., Azzeh, M., Patnaik, R., Stoian, A. P., Rizzo, M., Banerjee, Y. (2022). Reconnoitering the therapeutic role of curcumin in disease prevention and treatment: Lessons learnt and future directions. *Metabolites*, 12(7), Article 639. https://doi.org/10.3390/metabo12070639
28. Ucisik, M. H., Küpcü, S., Schuster, B., Sleytr, U. B. (2013). Characterization of CurcuEmulsomes: Nanoformulation for enhanced solubility and delivery of curcumin. *Journal of Nanobiotechnology*, 11(1), Article 37. https://doi.org/10.1186/1477-3155-11-37
29. Takahashi, M., Ishiko, T., Kamohara, H., Hidaka, H., Ikeda, O., Ogawa, M. et al. (2007). Curcumin (1,7-bis(4-hydroxy-3-methoxyphenyl)-1,6-heptadiene-3,5-dione) blocks the chemotaxis of neutrophils by inhibiting signal transduction through IL-8 receptors. *Mediators of Inflammation*, 2007(1), Article 10767. https://doi.org/10.1155/2007/10767
30. Majeed, Y., Ziaf, K., Ghani, M. A., Ahmad, I., Ahmad, M. A., Abbasi, K. Y. et al. (2020). Effect of different combinations of organic and synthetic sources of nutrients on growth, yield and quality parameters of turmeric under Faisalabad conditions. *Journal of Environmental and Agricultural Sciences*, 22(4), 1–7.
31. Dolase, P., Chaudhari, V. (2024). Review on cultivation practices of Haridra (*Curcuma longa* Linn.). *International Journal of Ayurveda and Pharma Research*, 12(9), 56–61. http://doi.org/10.47070/ijapr.v12i9.3394
32. Ibáñez, M. D., Blázquez, M. A. (2020). *Curcuma longa* L. rhizome essential oil from extraction to its agri-food applications. A review. *Plants*, 10(1), Article 44. https://doi.org/10.3390/plants10010044
33. Saha, G., Sharangi, A. B., Upadhyay, T. K., Al-Keridis, L. A., Alshammari, N., Al-abdallah, N. M. et al. (2022). Dynamics of drying turmeric rhizomes (*Curcuma longa* L.) with respect to its moisture, color, texture and quality. *Agronomy*, 12(6), Article 1420. https://doi.org/10.3390/agronomy12061420
34. Kumar, K., Gill, B. S. (2009). Effect of method of planting and harvesting time on growth, yield and quality of turmeric (*Curcuma longa* L.). *Journal of Spices and Aromatic Crops*, 18(1), 22–27.
35. Beshah, T. D., Saad, M. A. F., el Gazar, S., Farag, M. A. (2025). Curcuminoids: A multi-faceted review of green extraction methods and solubilization approaches to maximize their food and pharmaceutical applications. *Advances in Sample Preparation*, 13(1), Article 100159. https://doi.org/10.1016/j.sampre.2025.100159
36. Ciuca, M. D., Racovita, R. C. (2023). Curcumin: Overview of extraction methods, health benefits, and encapsulation and delivery using microemulsions and nanoemulsions. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(10), Article 8874. https://doi.org/10.3390/ijms24108874
37. Priyadarsini, K. I. (2014). The chemistry of curcumin: From extraction to therapeutic agent. *Molecules*, 19(12), 20091–20112. https://doi.org/10.3390/molecules191220091
38. Widmann, A. K., Wahl, M. A., Kammerer, D. R., Daniels, R. (2022). Supercritical fluid extraction with $CO_2$ of *Curcuma longa* L. in comparison to conventional solvent extraction. *Pharmaceutics*, 14(9), Article 1943. https://doi.org/10.3390/pharmaceutics14091943
39. Slaček, G., Kotnik, P., Osmić, A., Postružnik, V., Knez, Ž., Finšgar, M. et al. (2023). The extraction process, separation, and identification of curcuminoids from turmeric *Curcuma longa*. *Foods*, 12(21), Article 4000. https://doi.org/10.3390/foods12214000
40. Dandekar, D. V., Gaikar, V. G. (2003). Hydrotropic extraction of curcuminoids from turmeric. *Separation Science and Technology*, 38(5), 1185–1215. https://doi.org/10.1081/SS-120018130
41. Górnicka, J., Mika, M., Wróblewska, O., Siudem, P., Paradowska, K. (2023). Methods to improve the solubility of curcumin from turmeric. *Life*, 13(1), Article 207. https://doi.org/10.3390/life13010207
42. Obregón-Mendoza, M. A., Meza-Morales, W., Alvarez-Ricardo, Y., Estévez-Carmona, M. M., Enríquez, R. G. (2022). High yield synthesis of curcumin and symmetric curcuminoids: A "Click" and "Unclick" chemistry approach. *Molecules*, 28(1), Article 289. https://doi.org/10.3390/molecules28010289
43. Dandekar, D. V., Gaikar, V. G. (2002). Microwave assisted extraction of curcuminoids from *Curcuma longa*. *Separation Science and Technology*, 37(11), 2669–2690. http://doi.org/10.1081/SS-120004458
44. Stepanova, V. A., Guerrero, A., Schull, C., Christensen, J., Trudeau, C., Cook, J. et al. (2022). Hybrid synthetic and computational study of an optimized, solvent-free approach to curcuminoids. *ACS Omega*, 7(8), 7257–7277. https://doi.org/10.1021/acsomega.1c07006
45. Pabon, H. J. J. J. (2010). Synthesis of curcumin and related compounds. *Recueil des Travaux Chimiques des Pays-Bas*, 83(4), 379–386. http://doi.org/10.1002/recl.19640830407
46. Nguyen, V. T., Hoang, M. H. (2021). Principal component analysis based solvent map for optimisation of rate and yield of curcumin synthesis. *Egyptian Journal of Chemistry*, 64(2), 693–701. http://doi.org/10.21608/ejchem.2020.33197.2700
47. Lee, W. -H., Loo, C. -Y., Bebawy, M., Luk, F., Mason, R. S., Rohanizadeh, R. (2013). Curcumin and its derivatives: Their application in neuropharmacology and neuroscience in the 21st century. *Current Neuropharmacology*, 11(4), 338–378. https://doi.org/10.2174/1570159X11311040002
48. Vyas, A., Dandawate, P., Padhye, S., Ahmad, A., Sarkar, F. (2013). Perspectives on new synthetic curcumin analogs and their potential anticancer properties. *Current Pharmaceutical Design*, 19(11), 2047–2069.
49. Racz, C. -P., Racz, L. Z., Floare, C. G., Tomoaia, G., Horovitz, O., Riga, S. et al. (2023). Curcumin and whey protein concentrate binding: Thermodynamic and structural approach. *Food Hydrocolloids*, 139(1), Article 108547. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2023.108547
50. Barzegar, A. (2012). The role of electron-transfer and H-atom donation on the superb antioxidant activity and free radical reaction of curcumin. *Food Chemistry*, 135(3), 1369–1376. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.05.070
51. Manimaran, S., SambathKumar, K., Gayathri, R., Raja, K., Rajkamal, N., Venkatachalapathy, M. et al. (2018). Medicinal plant using ground state stabilization of natural antioxidant curcumin by keto-enol tautomerisation. *Natural Products and Bioprospecting*, 8(5), 369–390. https://doi.org/10.1007/s13659-018-0170-1
52. Erez, Y., Simkovitch, R., Shomer, S., Gepshtein, R., Huppert, D. (2014). Effect of acid on the ultraviolet-visible absorption and emission properties of curcumin. *The Journal of Physical Chemistry A*, 118(5), 872–884. https://doi.org/10.1021/jp411686d

53. Racz, L. Z., Racz, C. P., Pop, L. -C., Tomoaia, G., Mocanu, A., Barbu, I. et al. (2022). Strategies for improving bioavailability, bioactivity, and physical-chemical behavior of curcumin. *Molecules*, 27(20), Article 6854. https://doi.org/10.3390/molecules27206854
54. Huang, M., Zhai, B. -T., Fan, Y., Sun, J., Shi, Y. -J., Zhang, X. -F. et al. (2023). Targeted drug delivery systems for curcumin in breast cancer therapy. *International Journal of Nanomedicine*, 18(1), 4275–4311. https://doi.org/10.2147/IJN.S410688
55. Dias, L. D., Blanco, K. C., Mfouo-Tynga, I. S., Inada, N. M., Bagnato, V. S. (2020). Curcumin as a photosensitizer: From molecular structure to recent advances in antimicrobial photodynamic therapy. *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*, 45(1), Article 100384. https://doi.org/10.1016/j.jphotochemrev.2020.100384
56. Nardo, L., Andreoni, A., Masson, M., Haukvik, T., Tønnesen, H. H. (2011). Studies on curcumin and curcuminoids. XXXIX. Photophysical properties of bisdemethoxycurcumin. *Journal of Fluorescence*, 21(2), 627–635. https://doi.org/10.1007/s10895-010-0750-x
57. Nardo, L., Paderno, R., Andreoni, A., Másson, M., Haukvik, T., Tønnesen, H. H. (2008). Role of H-bond formation in the photoreactivity of curcumin. *Spectroscopy*, 22(2–3), 187–198. http://doi.org/10.3233/SPE-2008-0335
58. Nardo, L., Andreoni, A., Bondani, M., Másson, M., Haukvik, T., Tønnesen, H. H. (2012). Studies on curcumin and curcuminoids. XLVI. Photophysical properties of dimethoxycurcumin and bis-dehydroxycurcumin. *Journal of Fluorescence*, 22(2), 597–608. https://doi.org/10.1007/s10895-011-0995-z
59. Nardo, L., Maspero, A., Penoni, A., Palmisano, G., Ferrari, E., Saladini, M. (2017). Excited state dynamics of bis-dehydroxycurcumin tert-butyl ester, a diketo-shifted derivative of the photosensitizer curcumin. *PLoS One*, 12(4), Article e0175225. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0175225
60. Esatbeyoglu, T., Ulbrich, K., Rehberg, C., Rohn, S., Rimbach, G. (2015). Thermal stability, antioxidant, and anti-inflammatory activity of curcumin and its degradation product 4-vinyl guaiacol. *Food and Function*, 6(3), 887–893. https://doi.org/10.1039/c4fo00790e
61. Kharat, M., Du, Z., Zhang, G., McClements, D. J. (2017). Physical and chemical stability of curcumin in aqueous solutions and emulsions: Impact of pH, temperature, and molecular environment. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 65(8), 1525–1532. https://doi.org/10.1021/acs.jafc.6b04815
62. Kamaly, N., Yameen, B., Wu, J., Farokhzad, O. C. (2016). Degradable controlled-release polymers and polymeric nanoparticles: Mechanisms of controlling drug release. *Chemical Reviews*, 116(4), 2602–2663. https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.5b00346
63. Schneider, C., Gordon, O. N., Edwards, R. L., Luis, P. B. (2015). Degradation of curcumin: From mechanism to biological implications. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 63(35), 7606–7614. https://doi.org/10.1021/acs.jafc.5b00244
64. Azad, A. K., Lai, J., Sulaiman, W. M. A. W., Almoustafa, H., Alshehade, S. A., Kumarasamy, V. et al. (2024). The fabrication of polymer-based curcumin-loaded formulation as a drug delivery system: An updated review from 2017 to the present. *Pharmaceutics*, 16(2), Article 160. https://doi.org/10.3390/pharmaceutics16020160
65. Lai, D., Zhou, A., Tan, B. K., Tang, Y., Hamzah, S. S., Zhang, Z. et al. (2021). Preparation and photodynamic bactericidal effects of curcumin-β-cyclodextrin complex. *Food Chemistry*, 361, Article 130117. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130117
66. Tønnesen, H. H., Másson, M., Loftsson, T. (2002). Studies of curcumin and curcuminoids. XXVII. Cyclodextrin complexation: Solubility, chemical and photochemical stability. *International Journal of Pharmaceutics*, 244(1–2), 127–135. https://doi.org/10.1016/s0378-5173(02)00323-x
67. Scazzocchio, B., Minghetti, L., D'Archivio, M. (2020). Interaction between gut microbiota and curcumin: A new key of understanding for the health effects of curcumin. *Nutrients*, 12(9), Article 2499. https://doi.org/10.3390/nu12092499
68. Luis, P. B., Kunihiro, A. G., Funk, J. L., Schneider, C. (2020). Incomplete hydrolysis of curcumin conjugates by β-glucuronidase: Detection of complex conjugates in plasma. *Molecular Nutrition and Food Research*, 64(6), Article e1901037. https://doi.org/10.1002/mnfr.201901037
69. Abd El-Hack, M. E., El-Saadony, M. T., Swelum, A. A., Arif, M., Ghanima, M. M. A., Shukry, M. et al. (2021). Curcumin, the active substance of turmeric: Its effects on health and ways to improve its bioavailability. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 101(14), 5747–5762. https://doi.org/10.1002/jsfa.11372
70. Sathyabhama, M., Dharshini, L. C. P., Karthikeyan, A., Kalaiselvi, S., Min, T. (2022). The credible role of curcumin in oxidative stress-mediated mitochondrial dysfunction in mammals. *Biomolecules*, 12(10), Article 1405. https://doi.org/10.3390/biom12101405
71. Jakubczyk, K., Drukżga, A., Katarzyna, J., Skonieczna-Żydecka, K. (2020). Antioxidant potential of curcumin -A meta-analysis of randomized clinical trials. *Antioxidants*, 9(11), Article 1092. https://doi.org/10.3390/antiox9111092
72. Fouad, G. I., Ahmed, K. A. (2022). Curcumin ameliorates doxorubicin-induced cardiotoxicity and hepatotoxicity via suppressing oxidative stress and modulating iNOS, NF-κB, and TNF-α in rats. *Cardiovascular Toxicology*, 22(2), 152–166. https://doi.org/10.1007/s12012-021-09710-w
73. Dai, C., Lin, J., Li, H., Shen, Z., Wang, Y., Velkov, T. et al. (2022). The natural product curcumin as an antibacterial agent: Current achievements and problems. *Antioxidants*, 11(3), Article 459. https://doi.org/10.3390/antiox11030459
74. Adamczak, A., Ożarowski, M., Karpiński, T. M. (2020). Curcumin, a natural antimicrobial agent with strain-specific activity. *Pharmaceuticals*, 13(7), Article 153. https://doi.org/10.3390/ph13070153
75. Trigo-Gutierrez, J. K., Vega-Chacón, Y., Soares, A. B., Mima, E. G. O. (2021). Antimicrobial activity of curcumin in nanoformulations: A comprehensive review. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(13), Article 7130. https://doi.org/10.3390/ijms22137130
76. Dizaj, S. M, Shokrgozar, H., Yazdani, J., Memar, M. Y., Sharifi, S., Ghavimi, M. A. (2022). Antibacterial effects of curcumin nanocrystals against porphyromonas gingivalis isolated from patients with implant failure. *Clinics and Practice*, 12(5), 809–817. https://doi.org/10.3390/clinpract12050085
77. Marton, L. T., Pescinini-E-Salzedas, L. M., Camargo, M. E. C., Barbalho, S. M., Haber, J. F. D. S., Sinatora, R. V. et al. (2021). The effects of curcumin on diabetes mellitus: A systematic review. *Frontiers in Endocrinology*, 12(1), Article 669448. https://doi.org/10.3389/fendo.2021.669448
78. Cho, J. A., Park, S. H., Cho, J., Kim, J. O., Yoon, J. H., Park, E. (2020). Exercise and curcumin in combination improves cognitive function and attenuates er stress in diabetic rats. *Nutrients*, 12(5), Article 1309. https://doi.org/10.3390/nu12051309
79. Najafian, M. (2015). The effects of curcumin on alpha amylase in diabetics rats. *Zahedan Journal of Research in Medical Sciences*, 17(12), Article e5198. http://doi.org/10.17795/zjrms-5198
80. Lu, X., Wu, F., Jiang, M., Sun, X., Tian, G. (2019). Curcumin ameliorates gestational diabetes in mice partly through activating AMPK. *Pharmaceutical Biology*, 57(1), 250–254. https://doi.org/10.1080/13880209.2019.1594311
81. Clapp, M., Aurora, N., Herrera, L., Bhatia, M., Wilen, E., Wakefield, S. (2017). Gut microbiota's effect on mental health: The gut-brain axis. *Clinics and Practice*, 7(4), Article 987. https://doi.org/10.4081/cp.2017.987
82. Wu, S. -X., Li, J., Zhou, D. -D., Xiong, R. -G., Huang, S.-Y., Saimaiti, A. et al. (2022). Possible effects and mechanisms of dietary natural products and nutrients on depression and anxiety: A Narrative review. *Antioxidants*, 11(11), Article 2132. https://doi.org/10.3390/antiox11112132
83. Lamanna-Rama, N., Romero-Miguel, D., Desco, M., Soto-Montenegro, M. L. (2022). An update on the exploratory use of curcumin in neuropsychiatric disorders. *Antioxidants*, 11(2), Article 353. https://doi.org/10.3390/antiox11020353
84. Kulkarni, S., Dhir, A., Akula, K. K. (2009). Potentials of curcumin as an antidepressant. *ScientificWorldJournal*, 9(1), 1233–1241. http://doi.org/10.1100/tsw.2009.137
85. Kanchanatawan, B., Tangwongchai, S., Sughondhabhirom, A., Suppapitiporn, S., Hemrunrojn, S., Carvalho, A. F. et al. (2018). Add-on treatment with curcumin has antidepressive effects in thai patients with major depression: Results of a randomized double-blind placebo-controlled study. *Neurotoxicity Research*, 33(3), 621–633. https://doi.org/10.1007/s12640-017-9860-4
86. Anand, U., Dey, A., Chandel, A. K. S., Sanyal, R., Mishra, A., Pandey, D. K. et al. (2022). Cancer chemotherapy and beyond: Current status, drug candidates, associated risks and progress in targeted therapeutics. *Genes and Diseases*, 10(4), 1367–1401. https://doi.org/10.1016/j.gendis.2022.02.007
87. Yang, Z.-J., Huang, S.-Y., Zhou, D.-D., Xiong, R.-G., Zhao, C.-N., Fang, A.-P. et al. (2022). Effects and mechanisms of curcumin for the prevention and management of cancers: An updated review. *Antioxidants*, 11(8), Article 1481. https://doi.org/10.3390/antiox11081481
88. Hosseini, S. S., Reihani, R. Z., Doustvandi, M. A., Amini, M., Zargari, F., Baradaran, B. et al. (2022). Synergistic anticancer effects of curcumin and crocin on human colorectal cancer cells. *Molecular Biology Reports*, 49(9), 8741–8752. https://doi.org/10.1007/s11033-022-07719-0
89. Wang, M., Jiang, S., Zhou, L., Yu, F., Ding, H., Li, P. et al. (2019). Potential mechanisms of action of curcumin for cancer prevention: Focus on cellular signaling pathways and miRNAs. *International Journal of Biological Sciences*, 15(6), 1200–1214. https://doi.org/10.7150/ijbs.33710
90. Li, P., Pu, S., Lin, C., He, L., Zhao, H., Yang, C. et al. (2022). Curcumin selectively induces colon cancer cell apoptosis and S cell cycle arrest by regulates Rb/E2F/p53 pathway. *Journal of Molecular Structure*, 1263, Article 133180. https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2022.133180
91. Farahani, M. K., Atashi, A., Asadi, A. (2022). Evaluation of anticancer effects of curcumin on multicellular breast cancer spheroids. *Turkish Journal of Oncology*, 37(3), 285–290. http://doi.org/10.5505/tjo.2022.3512
92. Marsh, K., Bugusu, B. (2007). Food packaging? Roles, materials, and environmental issues. *Journal of Food Science*, 72(3), R39–R55. https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2007.00301.x
93. Karanth, S., Feng, S., Patra, D., Pradhan, A. K. (2023). Linking microbial contamination to food spoilage and food waste: The role of smart packaging, spoilage risk assessments, and date labeling. *Frontiers in Microbiology*, 14(1), Article 1198124. https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1198124
94. Nair, S. S., Trafiałek, J., Kolanowski, W. (2023). Edible packaging: A technological update for the sustainable future of the food industry. *Applied Sciences*, 13(14), Article 8234. https://doi.org/10.3390/app13148234
95. Gupta, D., Lall, A., Kumar, S., Patil, T. D., Gaikwad, K K. (2024). Plant-based edible films and coatings for food-packaging applications: Recent advances, applications, and trends. *Sustainable Food Technology*, 2(5), 1428–1455. http://doi.org/10.1039/D4FB00110A
96. Janowicz, M., Galus, S., Ciurzyńska, A., Nowacka, M. (2023). The potential of edible films, sheets, and coatings based on fruits and vegetables in the context of sustainable food packaging development. *Polymers*, 15(21), Article 4231. https://doi.org/10.3390/polym15214231
97. Devi, L. S., Jaiswal, A. K., Jaiswal, S. (2024). Lipid incorporated biopolymer based edible films and coatings in food packaging: A review. *Current Research in Food Science*, 8(1), Article 100720. https://doi.org/10.1016/j.crfs.2024.100720
98. Zhao, M., Han, P., Mu, H., Sun, S., Dong, J., Sun, J. et al. (2025). Food packaging films from natural polysaccharides and protein hydrogels: A comprehensive review. *Food Chemistry: X*, 25(1), Article 102174. https://doi.org/10.1016/j.fochx.2025.102174
99. Zibaei, R., Hasanvand, S., Hashami, Z., Roshandel, Z., Rouhi, M., Guimarães, J. T. et al. (2021). Applications of emerging botanical hydrocolloids for edible films: A review. *Carbohydrate Polymers*, 256(1), Article 117554. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.117554
100. Mihalca, V., Kerezsi, A. D., Weber, A., Gruber-Traub, C., Schmucker, J., Vodnar, D. C. et al. (2021). Protein-based films and coatings for food industry applications. *Polymers*, 13(5), Article 769. https://doi.org/10.3390/polym13050769
101. Jahangiri, F., Mohanty, A. K., Misra, M. (2024). Sustainable biodegradable coatings for food packaging: Challenges and opportunities. *Green Chemistry*, 26(9), 4934–4974. http://doi.org/10.1039/D3GC02647G
102. Weng, S., Marcet, I., Rendueles, M., Díaz, M. (2025). Edible films from the laboratory to industry: A review of the different production methods. *Food and Bioprocess Technology*, 18(1), 3245–3271. http://doi.org/10.1007/s11947-024-03641-4
103. Patil, V., Shams, R., Dash, K. K. (2023). Techno-functional characteristics, and potential applications of edible coatings: A comprehensive review. *Journal of Agriculture and Food Research*, 14(1), Article 100886. https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100886

104. Benbettaïeb, N., Karbowiak, T., Debeaufort, F. (2019). Bioactive edible films for food applications: Influence of the bioactive compounds on film structure and properties. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 59(7), 1137–1153. https://doi.org/10.1080/10408398.2017.1393384
105. Moeini, A., Pedram, P., Fattahi, E., Cerruti, P., Santagata, G. (2022). Edible polymers and secondary bioactive compounds for food packaging applications: Antimicrobial, mechanical, and gas barrier properties. *Polymers*, 14(12), Article 2395. https://doi.org/10.3390/polym14122395
106. Chawla, R., Sivakumar, S., Kaur, H. (2021). Antimicrobial edible films in food packaging: Current scenario and recent nanotechnological advancements — A review. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*, 2(1), Article 100024. https://doi.org/10.1016/j.carpta.2020.100024
107. Rezagholizade-Shirvan, A., Soltani, M., Shokri, S., Radfar, R., Arab, M., Shamloo, E. (2024). Bioactive compound encapsulation: Characteristics, applications in food systems, and implications for human health. *Food Chemistry: X*, 24(1), Article 101953. https://doi.org/10.1016/j.fochx.2024.101953
108. Barbosa, C. H., Andrade, M. A., Vilarinho, F., Fernando, A. L., Silva, A. S. (2021). Active edible packaging. *Encyclopedia*, 1(2), 360–370. https://doi.org/10.3390/encyclopedia1020030
109. Kumar, A., Nirmal, P., Kumar, M., Jose, A., Tomer, V., Oz, E. et al. (2023). Major phytochemicals: Recent advances in health benefits and extraction method. *Molecules*, 28(2), Article 887. https://doi.org/10.3390/molecules28020887
110. Kocaadam, B., Şanlier, N. (2017). Curcumin, an active component of turmeric (*Curcuma longa*), and its effects on health. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 57(13), 2889–2895. https://doi.org/10.1080/10408398.2015.1077195
111. Kunnumakkara, A. B., Hegde, M., Parama, D., Girisa, S., Kumar, A., Daimary, U. D. et al. (2023). Role of turmeric and curcumin in prevention and treatment of chronic diseases: Lessons learned from clinical trials. *ACS Pharmacology and Translational Science*, 6(4), 447–518. https://doi.org/10.1021/acsptsci.2c00012
112. Masuda, T., Toi, Y., Bando, H., Maekawa, T., Takeda, Y., Yamaguchi, H. (2002). Structural identification of new curcumin dimers and their contribution to the antioxidant mechanism of curcumin. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 50(9), 2524–2530. https://doi.org/10.1021/jf011601s
113. Nunes, Y. C., Mendes, N. M., de Lima, E. P., Chehadi, A. C., Lamas, C. B., Haber, J. F. S. et al. (2024). Curcumin: A golden approach to healthy aging: A systematic review of the evidence. *Nutrients*, 16(16), Article 2721. https://doi.org/10.3390/nu16162721
114. Kumari, A., Raina, N., Wahi, A., Goh, K. W., Sharma, P., Nagpal, R. et al. (2022). Wound-healing effects of curcumin and its nanoformulations: A comprehensive review. *Pharmaceutics*, 14(11), Article 2288. https://doi.org/10.3390/pharmaceutics14112288
115. Dairaku, I., Han, Y., Yanaka, N., Kato, N. (2010). Inhibitory effect of curcumin on IMP dehydrogenase, the target for anticancer and antiviral chemotherapy agents. *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*, 74(1), 185–187. https://doi.org/10.1271/bbb.90568
116. Gupta, S. C., Patchva, S., Koh, W., Aggarwal, B. B. (2012). Discovery of curcumin, a component of golden spice, and its miraculous biological activities. *Clinical and Experimental Pharmacology and Physiology*, 39(3), 283–299. https://doi.org/10.1111/j.1440-1681.2011.05648.x
117. WHO. (2013). Global action plan for the prevention and control of noncommunicable diseases 2013–2020. World Health Organization, Geneva, 2013.
118. He, Y., Yue, Y., Zheng, X., Zhang, K., Chen, S., Du, Z. (2015). Curcumin, inflammation, and chronic diseases: How are they linked? *Molecules*, 20(5), 9183–9213. https://doi.org/10.3390/molecules20059183
119. Peng, Y., Ao, M., Dong, B., Jiang, Y., Yu, L., Chen, Z. et al. (2021). Anti-inflammatory effects of curcumin in the inflammatory diseases: Status, limitations and countermeasures. *Drug Design, Development and Therapy*, 15(1), 4503–4525. https://doi.org/10.2147/DDDT.S327378
120. Varì, R., Scazzocchio, B., Silenzi, A., Giovannini, C., Masella, R. (2021). Obesity-associated inflammation: Does curcumin exert a beneficial role? *Nutrients*, 13(3), Article 1021. https://doi.org/10.3390/nu13031021
121. Safarian, H., Parizadeh, S. M. R., Saberi-Karimain, M., Darroudi, S., Javandoost, A., Mohammadi, F. et al. (2019). The effect of curcumin on serum copper and zinc and zn/cu ratio in individuals with metabolic syndrome: A double-blind clinical trial. *Journal of Dietary Supplements*, 16(6), 625–634. https://doi.org/10.1080/19390211.2018.1472711
122. Zhang, D. W., Fu, M., Gao, S. -H., Liu, J. -L. (2013). Curcumin and diabetes: A systematic review. *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*, 2013(1), Article 636053. https://doi.org/10.1155/2013/636053
123. Assis, R. P., Arcaro, C. A., Gutierres, V. O., Oliveira, J. O., Costa, P. I., Baviera, A. M. et al. (2017). Combined effects of curcumin and lycopene or bixin in yoghurt on inhibition of LDL oxidation and increases in HDL and paraoxonase levels in streptozotocin-diabetic rats. *International Journal of Molecular Sciences*, 18(4), Article 332. https://doi.org/10.3390/ijms18040332
124. Jamilian, M., Foroozanfard, F., Kavossian, E., Aghadavod, E., Shafabakhsh, R., Hoseini, A. et al. (2020). Effects of curcumin on body weight, glycemic control and serum lipids in women with polycystic ovary syndrome: A randomized, double-blind, placebo-controlled trial. *Clinical Nutrition ESPEN*, 36(1), 128–133. https://doi.org/10.1016/j.clnesp.2020.01.005
125. Davoodvandi, A., Farshadi, M., Zare, N., Akhlagh, S. A., Nosrani, E. A., Mahjoubin-Tehran, M. et al. (2021). Antimetastatic effects of curcumin in oral and gastrointestinal cancers. *Frontiers in Pharmacology*, 12(1), Article 668567. https://doi.org/10.3389/fphar.2021.668567
126. Spanoudaki, M., Papadopoulou, S. K., Antasouras, G., Papadopoulos, K. A., Psara, E., Vorvolakos, T. et al. (2024). Curcumin as a multifunctional spice ingredient against mental disorders in humans: Current clinical studies and bioavailability concerns. *Life*, 14(4), Article 479. https://doi.org/10.3390/life14040479
127. Sabet, S., Rashidinejad, A., Melton, L. D., McGillivray, D. J. (2021). Recent advances to improve curcumin oral bioavailability. *Trends in Food Science and Technology*, 110(1), 253–266. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.02.006
128. Peng, S., Li, Z., Zou, L., Liu, W., Liu, C., McClements, D. J. (2018). Improving curcumin solubility and bioavailability by encapsulation in saponin-coated curcumin nanoparticles prepared using a simple pH-driven loading method. *Food and Function*, 9(3), 1829–1839. https://doi.org/10.1039/c7fo01814b
129. Zheng, B., Peng, S., Zhang, X., McClements, D. J. (2018). Impact of delivery system type on curcumin bioaccessibility: Comparison of curcumin-loaded nanoemulsions with commercial curcumin supplements. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 66(41), 10816–10826. https://doi.org/10.1021/acs.jafc.8b03174
130. Peng, S., Li, Z., Zou, L., Liu, W., Liu, C., McClements, D. J. (2018). Enhancement of curcumin bioavailability by encapsulation in sophorolipid-coated nanoparticles: An *in vitro* and *in vivo* study. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 66(6), 1488–1497. https://doi.org/10.1021/acs.jafc.7b05478
131. Liu, Q., Li, F., Ji, N., Dai, L., Xiong, L., Sun, Q. (2021). Acetylated debranched starch micelles as a promising nanocarrier for curcumin. *Food Hydrocolloids*, 111(1), Article 106253. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106253
132. Gómez-Mascaraque, L. G., Sipoli, C. C., de La Torre, L. G., López-Rubio, A. (2017). Microencapsulation structures based on protein-coated liposomes obtained through electrospraying for the stabilization and improved bioaccessibility of curcumin. *Food Chemistry*, 233(1), 343–350. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.04.133
133. Alavi, F., Ciftci, O. N. (2024). Increasing the bioavailability of curcumin using a green supercritical fluid technology-assisted approach based on simultaneous starch aerogel formation-curcumin impregnation. *Food Chemistry*, 455(1), Article 139468. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.139468
134. Aditya, N. P., Aditya, S., Yang, H., Kim, H. W., Park, S. O., Ko, S. (2015). Co-delivery of hydrophobic curcumin and hydrophilic catechin by a water-in-oil-in-water double emulsion. *Food Chemistry*, 173(1), 7–13. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.09.131
135. Ahmed, K., Li, Y., McClements, D. J., Xiao, H. (2012). Nanoemulsion -and emulsion-based delivery systems for curcumin: Encapsulation and release properties. *Food Chemistry*, 132(2), 799–807. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.11.039
136. Shah, B. R., Zhang, C., Li, Y., Li, B. (2016). Bioaccessibility and antioxidant activity of curcumin after encapsulated by nano and Pickering emulsion based on chitosan-tripolyphosphate nanoparticles. *Food Research International*, 89 (Part 1), 399–407. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2016.08.022
137. Song, Y., Su, S., Yang, T., Li, B., Li, L., Zhang, X. (2023). Enhanced bioaccessibility of curcumin in Pickering emulsions stabilized by solid lipid particles. *LWT*, 188(1), Article 115481. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.115481
138. Pan, K., Luo, Y., Gan, Y., Baek, S.J., Zhong, Q. (2014). pH-driven encapsulation of curcumin in self-assembled casein nanoparticles for enhanced dispersibility and bioactivity. *Soft Matter*, 10(35), 6820–6830. http://doi.org/10.1039/c4sm00239c
139. Roy, S., Rhim, J. -W. (2021). Antioxidant and antimicrobial poly (vinyl alcohol)-based films incorporated with grapefruit seed extract and curcumin. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(1), Article 104694. https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104694
140. Xiao, Y., Liu, Y., Kang, S., Cui, M., Xu, H. (2021). Development of pH-responsive antioxidant soy protein isolate films incorporated with cellulose nanocrystals and curcumin nanocapsules to monitor shrimp freshness. *Food Hydrocolloids*, 120(1), Article 106893. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.106893
141. Roy, S., Rhim, J. -W. (2020). Carboxymethyl cellulose-based antioxidant and antimicrobial active packaging film incorporated with curcumin and zinc oxide. *International Journal of Biological Macromolecules*, 148(1), 666–676. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.01.204
142. Tian, Y., Yang, X., Cao, C., Lv, Z., Han, C., Guo, Q. et al. (2024). Improved antioxidant activities of edible films by curcumin-containing with zein/polysaccharide. *Food Bioscience*, 57(1), Article 103538. https://doi.org/10.1016/j.fbio.2023.103538
143. Rostami, H., Esfahani, A. A. (2019). Development a smart edible nanocomposite based on mucilage of Melissa officinalis seed/montmorillonite (MMT)/curcumin. *International Journal of Biological Macromolecules*, 141(1), 171–177. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.08.261
144. Taghinia, P., Abdolshahi, A., Sedaghati, S., Shokrollahi, B. (2021). Smart edible films based on mucilage of lallemantia iberica seed incorporated with curcumin for freshness monitoring. *Food Science and Nutrition*, 9(2), 1222–1231. http://doi.org/10.1002/fsn3.2114
145. Manna, P. J., Mitra, T., Pramanik, N., Kavitha, V., Gnanamani, A., Kundu, P. P. (2015). Potential use of curcumin loaded carboxymethylated guar gum grafted gelatin film for biomedical applications. *International Journal of Biological Macromolecules*, 75(1), 437–446. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2015.01.047
146. Musso, Y.S., Salgado, P.R., Mauri, A.N. (2017). Smart edible films based on gelatin and curcumin. *Food Hydrocolloids*, 66(1), 8–15. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2016.11.007
147. Hegde, M., Girisa, S., BharathwajChetty, B., Vishwa, R., Kunnumakkara, A. B. (2023). Curcumin formulations for better bioavailability: What we learned from clinical trials thus far? *ACS Omega*, 8(12), 10713–10746. https://doi.org/10.1021/acsomega.2c07326
148. Ghosh, S. S., He, H., Wang, J., Gehr, T. W., Ghosh, S. (2018). Curcumin-mediated regulation of intestinal barrier function: The mechanism underlying its beneficial effects. *Tissue Barriers*, 6(1), Article e1425085. https://doi.org/10.1080/21688370.2018.1425085
149. Li, H., Liu, M., Ju, X., Zhang, H., Xia, N., Wang, J. et al. (2024). Physico-chemical characteristics of pH-driven active film loading with curcumin based on the egg white protein and sodium alginate matrices. *Foods*, 13(9), Article 1340. https://doi.org/10.3390/foods13091340
150. Gunathilake, T.M.S.U., Ching, Y.C., Chuah, C.Y., Rahman, N. A., Nai-Shang, L. (2020). pH-responsive poly (lactic acid)/sodium carboxymethyl cellulose film for enhanced delivery of curcumin in vitro. *Journal of Drug Delivery Science and Technology*, 58(1), Article 101787. https://doi.org/10.1016/j.jddst.2020.101787
151. Zhang, Z., Zhang, R., Zou, L., Chen, L., Ahmed, Y., Al Bishri, W. et al. (2016). Encapsulation of curcumin in polysaccharide-based hydrogel beads: Impact of bead type on lipid digestion and curcumin bioaccessibility. *Food Hydrocolloids*, 58(1), 160–170. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2016.02.036
152. Ghosh, T., Nakano, K., Katiyar, V. (2021). Curcumin doped functionalized cellulose nanofibers based edible chitosan coating on kiwifruits. *International Journal of Biological Macromolecules*, 184(1), 936–945. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.06.098

153. Shen, W., Yan, M., Wu, S., Ge, X., Liu, S., Du, Y. et al. (2022). Chitosan nanoparticles embedded with curcumin and its application in pork antioxidant edible coating. *International Journal of Biological Macromolecules*, 204(1), 410–418. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.02.025
154. Bojorges, H., Ríos-Corripio, M. A., Hernández-Cázares, A. S., Hidalgo-Contreras, J. V., Contreras-Oliva, A. (2020). Effect of the application of an edible film with turmeric (*Curcuma longa* L.) on the oxidative stability of meat. *Food Science and Nutrition*, 8(8), 4308–4319. https://doi.org/10.1002/fsn3.1728
155. Hussain, Y., Alam, W., Ullah, H., Dacrema, M., Daglia, M., Khan, H. et al. (2022). Antimicrobial potential of curcumin: Therapeutic potential and challenges to clinical applications. *Antibiotics*, 11(3), Article 322. https://doi.org/10.3390/antibiotics11030322
156. Farshidfar, N., Tanideh, N., Emami, Z., Aslani, F. S., Sarafraz, N., Khodabandeh, Z. et al. (2022). Incorporation of curcumin into collagen-multiwalled carbon nanotubes nanocomposite scaffold: An in vitro and in vivo study. *Journal of Materials Research and Technology*, 21(1), 4558–4576. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.11.022
157. Singh, B. G., Bagora, N., Nayak, M., Ajish, J. K., Gupta, N., Kunwar, A. (2024). The preparation of curcumin-loaded pickering emulsion using gelatin — chitosan colloidal particles as emulsifier for possible application as a bio-inspired cosmetic formulation. *Pharmaceutics*, 16(3), Article 356. https://doi.org/10.3390/pharmaceutics16030356
158. Vostrikova, N. L., Minaev, M. Y., Chikovany, K. G. (2021). Determining the authenticity of turmeric. *Food Systems*, 4(1), 62–70. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2021-4-1-62-70 (In Russian)
159. Etxabide, A., Kilmartin, P. A., Maté, J. I. (2021). Color stability and pH-indicator ability of curcumin, anthocyanin and betanin containing colorants under different storage conditions for intelligent packaging development. *Food Control*, 121(1), Article 107645. https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2020.107645


| AUTHOR INFORMATION | СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ |
|---|---|
| **Affiliation** | **Принадлежность к организации** |
| **Bima P. Pratama**, PhD in Post-harvest Technology, Researcher, Research Center for Agroindustry, National Research and Innovation Agency (BRIN)<br>Jl. Raya Serpong, South Tangerang, Banten, West Java, 15310, Indonesia<br>E-mail: bimaputra.pratama@gmail.com<br>ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3068-8718 | **Бима П. Пратама**, PhD в области послеуборочных технологий, научный сотрудник, Научно-исследовательский центр агропромышленности, Национальное агентство исследований и инноваций (BRIN)<br>Джалан Рая Серпонг, Южный Тангеранг, Бантен, Западная Ява, 15310, Индонезия<br>E-mail: bimaputra.pratama@gmail.com<br>ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3068-8718 |
| **Aswin R. Khairullah**, PhD in Veterinary Science, Researcher, Research Center for Veterinary Science, National Research and Innovation Agency (BRIN)<br>Jl. Raya Bogor Km. 46 Cibinong, Bogor, West Java, 16911, Indonesia<br>E-mail: aswinrafif@gmail.com<br>ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9421-9342 | **Асвин Р. Хайрулла**, PhD в области ветеринарных наук, научный сотрудник, Научно-исследовательский центр ветеринарных наук, Национальное агентство исследований и инноваций (BRIN)<br>16911, Индонезия, Западная Ява, Богор, Джалан Рая Богор 46 км<br>E-mail: aswinrafif@gmail.com<br>ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9421-9342 |
| **Ilma F. Ma'ruf**, PhD in Chemistry, Researcher, Research Center for Pharmaceutical Ingredients and Traditional Medicine, National Research and Innovation Agency (BRIN)<br>Jl. Raya Bogor Km. 46 Cibinong, Bogor, West Java, 16911, Indonesia<br>E-mail: Ilma005@brin.go.id<br>ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9641-8222 | **Ильма Фаузия Маруф**, PhD в области химических наук, научный сотрудник, Научно-исследовательский центр фармацевтических ингредиентов и традиционной медицины, Национальное агентство исследований и инноваций (BRIN)<br>16911, Индонезия, Западная Ява, Богор, Джалан Рая Богор 46 км<br>E-mail: Ilma005@brin.go.id<br>ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9641-8222 |
| **Adeyinka O. Akintunde**, PhD in Agriculture, Lecturer, Department of Agriculture and Industrial Technology, Babcock University Ilishan-Remo 121103, Ogun State, Nigeria<br>E-mail: adeyinka.akintunde@gmail.com<br>ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6013-0902 | **Адейинка О. Акинтунде**, PhD в обсласти сельскохозяйственных наук, преподаватель, Кафедра сельского хозяйства и промышленных технологий, Университет Бэбкока<br>121103, Нигерия, Штат Огун, Илишан-Ремо<br>E-mail: adeyinka.akintunde@gmail.com<br>ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6013-0902 |
| **Imam Mustofa**, PhD in Veterinary Reproduction, Professor, Division of Veterinary Reproduction, Faculty of Veterinary Medicine, Universitas Airlangga, Kampus C Mulyorejo, Jl. Dr. Ir. H. Soekarno, Surabaya, East Java, 60115, Indonesia<br>E-mail: imam.mustofa@fkh.unair.ac.id<br>ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4543-1659 | **Имам Мустофа**, PhD в области ветеринарной репродукции, профессор, Кафедра ветеринарной репродукции, Факультет ветеринарной медицины, Университет Эйрлангга<br>60115, Индонезия, Восточная Ява, Сурабая, округ Мулиорехо, Джалан Эйрлангга<br>E-mail: imam.mustofa@fkh.unair.ac.id<br>ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4543-1659 |
| **Sri Mulyati**, PhD in Veterinary Reproduction, Associate Professor, Division of Veterinary Reproduction, Faculty of Veterinary Medicine, Universitas Airlangga Kampus C Mulyorejo, Jl. Dr. Ir. H. Soekarno, Surabaya, East Java, 60115, Indonesia<br>E-mail: sri-m@fkh.unair.ac.id<br>ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0193-4898<br>* corresponding author | **Шри Муляти**, PhD в области ветеринарной репродукции, доцент, Кафедра ветеринарной репродукции, Факультет ветеринарной медицины, Университет Эйрлангга<br>16911, Индонезия, Западная Ява, Богор, Джалан Рая Богор 46 км<br>E-mail: sri-m@fkh.unair.ac.id<br>ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0193-4898<br>* автор для переписки |
| **Riza Z. Ahmad**, PhD in Veterinary Micology, Researcher, Research Center for Veterinary Science, National Research and Innovation Agency (BRIN)<br>Jl. Raya Bogor Km. 46 Cibinong, Bogor, West Java, 16911, Indonesia<br>E-mail: riza011@brin.go.id<br>ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2067-717X | **Риза З. Ахмад**, PhD в области ветеринарной микологии, научный сотрудник, Научно-исследовательский центр ветеринарных наук, Национальное агентство исследований и инноваций (BRIN)<br>16911, Индонезия, Западная Ява, Богор, Джалан Рая Богор 46 км<br>E-mail: riza011@brin.go.id<br>ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2067-717X |
| **Arif N. M. Ansori**, PhD in Veterinary Science, Researcher, Postgraduate School, Universitas Airlangga<br>Jl. Airlangga 4–6, Surabaya, East Java, 60286, Indonesia<br>E-mail: ansori.anm@gmail.com<br>ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1279-3904 | **Ариф Нур Мухаммад Ансори**, PhD в области ветеринарных наук, научный сотрудник, Департамент аспирантуры, Университет Эйрлангга<br>60115, Индонезия, Восточная Ява, Сурабая, округ Мулиорехо, Джалан Эйрлангга<br>E-mail: ansori.anm@gmail.com<br>ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1279-3904 |
| **Contribution** | **Критерии авторства** |
| Authors are 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/10.21323/2618-9771-2025-8-3-355-361

Поступила 11.06.2025
Поступила после рецензирования 12.08.2025
Принята в печать 18.08.2025
© Посокина Н. Е., Захарова А. И., 2025

https://www.fsjour.com/jour
Обзорная статья
Open access

# СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ СЪЕДОБНЫХ ПОКРЫТИЙ ОВОЩЕЙ И ФРУКТОВ

**Посокина Н. Е.*, Захарова А. И.**

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

*КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:* *съедобные покрытия, фрукты, овощи, качество, сроки годности, хранимоспособность*

АННОТАЦИЯ

В современном мире возрастает интерес к производству и потреблению продуктов питания с минимальной обработкой. Потребители все чаще отдают предпочтение свежим овощам и фруктам, т. к. употребление этих продуктов связано с многочисленными преимуществами для здоровья. Фрукты и овощи являются богатым источником фитохимических веществ, обладающих противовоспалительными, антиоксидантными и фитоэстрогенными свойствами. В связи с этим для производителей первостепенной задачей становится максимальное сохранение свежести и полезных свойств фруктов и овощей в течение длительного периода хранения. Фрукты и овощи относятся к категории скоропортящихся продуктов, поскольку немногие из них способны долго сохранять свои качества при комнатной температуре. Потребители стремятся приобретать высококачественные продукты с длительным сроком годности, не содержащие химические консерванты. В качестве замены традиционной пластиковой упаковке все большую популярность приобретают съедобные покрытия. Тонкий защитный слой съедобных покрытий способствует увеличению срока хранения продуктов после сбора урожая, обработки, транспортировки и хранения. Благодаря своим свойствам, эти покрытия предотвращают порчу и обезвоживание продуктов, сохраняют их качество и органолептические характеристики. Они не оказывают влияния на пищевую ценность фруктов и овощей, но могут быть модифицированы путем добавления ингредиентов, улучшающих их пищевую ценность. Важное преимущество съедобных покрытий — возможность введения в полимерную структуру активных веществ, которые улучшают органолептические характеристики продукта и употребляются вместе с ним. Целью данного обзора являлось рассмотрение видов материалов, методов применения съедобных покрытий для улучшения качества фруктов и овощей и для продления срока годности после сбора урожая.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Исследования проводились в рамках государственного задания ФГБНУ «ФНЦ пищевых систем им. В. М. Горбатова» РАН FGUS-2024-0004.

Received 11.06.2025
Accepted in revised 12.08.2025
Accepted for publication 18.08.2025
© Posokina N. E., Zakharova A. I., 2025

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

# MODERN APPROACHES TO THE USE OF EDIBLE COATINGS FOR VEGETABLES AND FRUITS

Natalia E. Posokina*, Anna I. Zakharova

All-Russian Scientific Research Institute of Preservation Technology, Vidnoe, Moscow region, Russia

*KEY WORDS:* *edible coatings, fruits, vegetables, quality, shelf life, storage ability*

ABSTRACT

In the modern world, there is a growing interest in the production and consumption of minimally processed food products. Consumers increasingly prefer fresh vegetables and fruits, as the consumption of these products is associated with numerous health benefits. Fruits and vegetables are a rich source of phytochemicals with anti-inflammatory, antioxidant and phytoestrogenic properties. In this regard, the primary task for producers is to maximize the freshness and beneficial properties of fruits and vegetables over a long shelf life. Fruits and vegetables are classified as perishable products, since only a few of them can retain their qualities for a long time at room temperature. Consumers strive to purchase high-quality products with a long shelf life that do not contain chemical preservatives. Edible coatings are becoming increasingly popular as a replacement for traditional plastic packaging. A thin protective layer of edible coatings helps to increase the shelf life of products after harvesting, processing, transportation and storage. Due to their properties, these coatings prevent spoilage and dehydration of products, preserve their quality and organoleptic characteristics. They do not affect the nutritional value of fruits and vegetables, but can be modified by adding ingredients that improve their nutritional value. An important advantage of such coatings is the ability to introduce various active substances into the polymer structure, which are subsequently consumed with the product, improving its organoleptic characteristics. The purpose of this review was to consider the types of materials, methods of using edible coatings to improve the quality of fruits and vegetables and extend shelf life after harvest.

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

В современном мире набирает популярность производство и потребление минимально переработанных продуктов питания. С изменением образа жизни фокус внимания покупателей все чаще переключается на свежие фрукты и овощи. Потребление фруктов и овощей связано с различными преимуществами для здоровья человека. Их можно употреблять как в свежем, так и в переработанном виде [1,2,3,4]. При регулярном употреблении фруктов и овощей снижаются риски возникновения ряда хронических заболеваний, таких как рак, ожирение, заболевания сердца и сосудов и др. Фрукты и овощи являются источником фитохимических веществ, которые действуют как противовоспалительные агенты, антиоксиданты

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: **Посокина, Н. Е., Захарова, А. И.** (2025). Современные подходы к использованию съедобных покрытий овощей и фруктов. *Пищевые системы*, 8(3), 355–361. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-3-355-361

FOR CITATION: **Posokina, N. E., Zakharova, A. I.** (2025). Modern approaches to the use of edible coatings for vegetables and fruits. *Food Systems,* 8(3), 355–361. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-3-355-361

и фитоэстрогены [5]. В связи с этим для производителей основной задачей становится максимальное сохранение нативных свойств свежих фруктов и овощей в течение длительного времени хранения [1,2]. Свежие фрукты и овощи считаются скоропортящимися, потому что очень немногие из них могут храниться долго при комнатной температуре. Большинство из них имеют срок годности от нескольких дней до нескольких недель и должны храниться в охлаждаемых условиях [6]. Также значительные потери происходят из-за физических и механических повреждений и неадекватных условий хранения. Качество фруктов и овощей связано с такими факторами, как климатические условия, предуборочные условия, зрелость при сборе урожая, сортовые особенности [7,8]. Решение проблемы послеуборочных потерь фруктов и овощей остается серьезной задачей в сельском хозяйстве. Из-за порчи на различных этапах обработки после сбора урожая теряется более 20–22% от общего объема производства фруктов [9,10]. Эти потери, часто достигающие 50% в развивающихся странах, в первую очередь обусловлены природой садовых культур, содержащих большое количество влаги и обладающих высокой ферментативной активностью [11]. Их короткие сроки хранения обусловлены такими процессами, как транспирация, дыхание и созревание, которые приводят к ухудшению качества, а также к значительным экономическим потерям. Несоблюдение правил хранения, неправильная обработка и транспортировка усугубляют эти потери, подчеркивая необходимость эффективных стратегий управления после сбора урожая. Без соответствующих технологий хранения, упаковки, транспортировки и обработки значительные объемы продукции выбрасываются [12]. Правильно подобранный метод хранения и контроль качественных параметров фруктов и овощей, таких как потеря веса, содержание воды, цвет, твердость, состав атмосферы, будут способствовать продлению их срока годности [13,14,15]. Состав атмосферы в процессе сбора урожая, температура, относительная влажность и степень заражения микроорганизмами существенно влияют на их срок годности [16]. Также присутствие патогенных микроорганизмов на поверхности способствует заражению мякоти плода. Высокие уровни питательных элементов и сахаров делают их особенно восприимчивыми к заражению и приводят к разрушению текстуры, к появлению неприятного привкуса и к потемнению. Такие биологические факторы, как дыхание, выработка этилена и устойчивость к диффузии воды, зависят от физиологической стадии сбора урожая и условий хранения, от вида и сорта фруктов и овощей. Изменение соотношения между потреблением кислорода и выработкой углекислого газа после сбора урожая приводит к тому, что клетки больше не обновляются, но при этом скорость газообмена увеличивается, увеличивается. Это вызывает метаболические изменения, приводящие к быстрой порче продукта и к снижению пищевой ценности [17,18].

Замедление процессов созревания, высыхания и старения, а также подавление роста микробов способствуют продлению срока хранения фруктов и овощей после сбора [17,19].) При этом упаковка играет ключевую роль в продлении срока годности скоропортящихся продуктов на этапах сбора урожая, его упаковки и транспортировки [20,21]. Традиционные упаковочные материалы, состоящие из небиоразлагаемых полимеров на основе нефти, создают угрозу для окружающей среды и способствуют истощению невозобновляемых ресурсов [22]. Использование нефти для производства пластика привлекает все большее внимание общественности и приводит к повышению спроса на экологически чистые и безопасные упаковочные материалы. Поиск замены пластиковой упаковки в пищевой промышленности стала необходимостью времени. Съедобные покрытия стали альтернативой обычной пластиковой упаковке [9,20,22,23,24]. Они представляют собой тонкий защитный барьер, который способствует продлению срока годности продуктов питания после сбора урожая, обработки, транспортировки и хранения. Благодаря своим свойствам эти покрытия предотвращают порчу продуктов и обезвоживание, сохраняют качество, цвет, текстуру и вкус. Также они не изменяют пищевую ценность фруктов и овощей, при этом могут быть дополнены добавками, которые способствуют ее повышению [25]. Съедобное покрытие, нанесенное на поверхность, можно считать составной частью продукта, поскольку его можно употреблять в пищу. Применение съедобных покрытий является экологически безопасным, так как их производство минимизирует выбросы загрязняющих веществ [2,9]. При выборе продуктов питания покупателями внешний вид является наиболее важным фактором. Очевидная роль съедобного покрытия заключается в том, чтобы служить механическим барьером для пищевых продуктов. Съедобные покрытия являются перспективной технологией сохранения фруктов и овощей, повышающей безопасность и защищающей органолептические и питательные качества растительных объектов [26,27].

Задачи данного исследования — проанализировать виды съедобных покрытий, сферу их применения и перспективы развития в пищевой промышленности.

## 2. Материалы и методы

Объектами исследования выступали нормативные документы и научные работы российских и иностранных авторов, посвященные применению съедобных покрытий для увеличения хранимоспособности растительных объектов. Поиск данных осуществлялся с использованием платформ eLibrary.ru, Scopus, ResearchGate, а также открытых интернет-источников. Для проведения поиска публикаций использовались различные комбинации ключевых слов, такие как «съедобные покрытия», «растительные объекты», «фрукты», «овощи», «качество» и «срок годности». На этапе отбора материалов исключались те источники, в которых отсутствовали полные тексты научных трудов. Основная масса проанализированных публикаций охватывала временной промежуток с 2018 по 2025 годы.

## 3. Съедобные покрытия

Съедобные покрытия представляют собой тонкие слои натуральных или синтетических пищевых материалов, наносимые на поверхность продуктов для улучшения их сохранности, внешнего вида и функциональных свойств. Они создают барьер, защищающий от влаги, кислорода, микробов и механических повреждений, а также могут обогащать продукт полезными веществами [28]. Также они призваны улучшить внешний вид продукта. При этом покрытия могут содержать антиоксиданты, витамины, ароматизаторы или пробиотики [29]. На сегодняшний день активно разрабатываются съедобные покрытия с улучшенными свойствами, не уступающими синтетическим материалам. Такие качества, как механическая прочность, прозрачность, легкость и устойчивость к воздействию влаги, делают эти покрытия особенно перспективными. Выполняя роль барьера, они снижают уровень влажности, предотвращают миграцию растворенных веществ, замедляют дыхание, газообмен и скорость окислительных процессов, что позволяет эффективно продлевать срок хранения свежих продуктов [30].

## 4. Методы нанесения

Съедобные покрытия наносятся различными методами, включая погружение в раствор, распыление или нанесение слоя. Определение наиболее подходящего метода нанесения покрытия для конкретного продукта питания зависит от множества факторов, таких как назначение защитного слоя и свойства поверхности продукта. Основная цель такой обработки заключается в регулировании влагопереноса, газообмена и процессов окисления. Кроме того, съедобные покрытия могут содержать функциональные ингредиенты, которые после нанесения на продукты питания улучшают их безопасность, а также питательные и органолептические характеристики. При использовании таких покрытий для фруктов или овощей необходимо учитывать их качественные параметры, включая органолептические свойства, степень микробной нагрузки, цвет, твердость и пищевую ценность. Также перед нанесением покрытия необходимо учесть такие особенности, как степень созревания и порчи обрабатываемого продукта. Эти показатели зависят от специфики конкретного вида продукта и условий его хранения [22].

Методы нанесения покрытий различаются по своей эффективности, причем у каждого из них есть как преимущества, так и недостатки [31]. Погружение — простой и распространенный способ нанесения покрытий на фрукты или овощи, используемый при высокой вязкости раствора покрытия. Этот метод проводится путем погружения продукта в раствор на период времени от 5 до 30 секунд, при этом контролируются показатели плотности и поверхностного натяжения [32]. Первый шаг включает в себя погружение и выдержку, при котором продукт помещают в раствор покрытия и оставляют в нем на определенное время. Затем следует процесс осаждения, в ходе которого раствор прикрепляется к поверхности продукта. Второй этап — испарение растворителя, что приводит к образованию тонкого слоя покрытия на поверхности продукта (Рисунок 1).

На качество покрытия, полученного данным методом, влияют разнообразные факторы. Среди них можно выделить количество циклов нанесения, скорость извлечения продукта из раствора и время погружения. Также немаловажную роль играют характеристики самого раствора покрытия, такие как его плотность, вязкость и величина поверхностного натяжения. Условия сушки и свойства поверхности продукта оказывают существенное влияние на плотность и структуру образующегося покрытия. Одной из главных проблем этого метода является риск получения неравномерного покрытия.




Рисунок 1. **Этапы метода погружения для нанесения съедобного покрытия (адаптировано из [31])**
Figure 1. **Stages of the dipping method for application of edible coating (adapted from [31])**

Это может привести к образованию участков, через которые продукт «дышит», а также к повреждению его поверхности. Еще одним недостатком считается потребность в значительном объеме раствора покрытия, что усложняет достижение оптимального результата. Продолжительность погружения в растворе играет важную роль, поскольку длительное воздействие может привести к избыточному поглощению влаги, а недостаточное время контакта — к неравномерному нанесению покрытия. Метод погружения показал, что покрытия из алоэ вера с добавлением салициловой кислоты эффективно сохраняют фенольные соединения, твердость и массу апельсинов, одновременно обеспечивая противомикробное действие. Кроме того, обнаружено, что композитное покрытие с экстрактом листьев лотоса продлевает срок хранения свежих ягод годжи, замедляя процессы разложения и снижая содержание малонового диальдегида; при этом наноэмульсии из альгината натрия и цитраля, применяемые для ананасов, обеспечивают замедление роста микроорганизмов, снижение интенсивности дыхательной активности и сохранение цвета [33–35].

Растворы с низкой вязкостью, пригодные для распыления под высоким давлением, целесообразно наносить методом распыления (Рисунок 2). Такой способ позволяет контролировать размер образующихся капель раствора. Параметры процесса зависят от толщины распылителя, температуры сопла, скорости воздушного и жидкостного потоков, влажности поступающего воздуха и от самого раствора, а также от времени сушки и от температуры [36]. Стандартные распылители могут формировать мелкодисперсные аэрозоли с размером капель до 20 мкм. Одним из главных преимуществ этого метода является увеличение площади поверхности жидкого покрытия за счет образования мелких капель и их равномерного распределения по поверхности [31].

В разных отраслях промышленности используются различные методы распыления, включая распыление под давлением, аэрозольное распыление и безвоздушное аэрозольное распыление. Каждый из этих методов отличается принципом работы и приводит к разным результатам. Среди наиболее популярных видов распылительных устройств особое внимание уделяется пневматическим и гидравлическим форсункам [31]. Для создания микро- и субмикрокапель

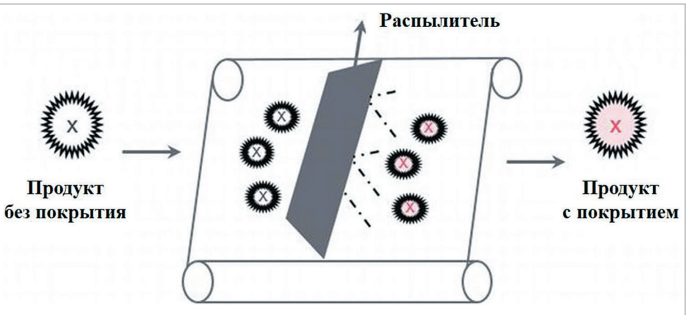



Рисунок 2. **Метод распыления для нанесения съедобного покрытия (адаптировано из [37])**
Figure 2. **Spraying method for application of edible coating (adapted from [37])**

со строго контролируемым размером используют метод электрораспыления. Заряд и размер капель могут быть скорректированы методом электрического воздействия. Перемещение заряженных капель поддается управлению посредством электрического поля. Например, съедобное покрытие, созданное на основе ксантановой камеди с добавлением лимонной кислоты и глицерина, было успешно нанесено на срезы корней лотоса с использованием метода распыления. Результаты показали значительное сохранение цвета обработанных корней во время хранения, также эффективное подавление ферментативного потемнения [38].

Также существует метод сшивания, который объединяет методы погружения и распыления (Рисунок 3). Сшивание полимерных цепей осуществляется через ковалентные и нековалентные связи. Для увеличения устойчивости и уплотнения покрытия обычно используют сшивающий агент. Эти покрытия имеют ряд преимуществ, включая улучшенные механические характеристики и высокую химическую и термическую устойчивость. Такой подход считается эффективным для биополимерных материалов, изготовленных на основе полисахаридов или белков.

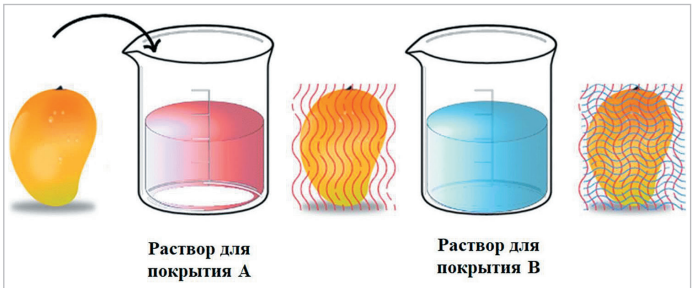



Рисунок 3. **Метод сшивания съедобного покрытия (адаптировано из [31])**
Figure 3. **Cross-linking method for edible coating (adapted from [31])**

Независимо от выбранного метода нанесения, на поверхности продукта формируется тонкое покрытие, которое действует как полупроницаемая мембрана. Такие покрытия уменьшают скорость газообмена и становятся основой для новых упаковочных материалов, позволяя продлить сроки хранения пищевых продуктов.

## 5. Материалы

Материалы, используемые для создания съедобных покрытий, изготавливаются на основе полисахаридов, липидов или белков (Рисунок 4).

Полисахариды представляют собой натуральные полимеры, широко применяемые при изготовлении съедобных покрытий и пленок. Полисахаридные покрытия чаще всего производят на основе пектина, декстрина, хитозана, целлюлозы, крахмала, альгината и камедей [39]. Эти соединения являются ключевыми компонентами покрытий, которые эффективно препятствуют проникновению кислорода благодаря своей упорядоченной структуре и наличию водородных связей. Тем не менее из-за своей гидрофильной природы полисахариды обладают ограниченной способностью создавать сильную паронепроницаемость [37].

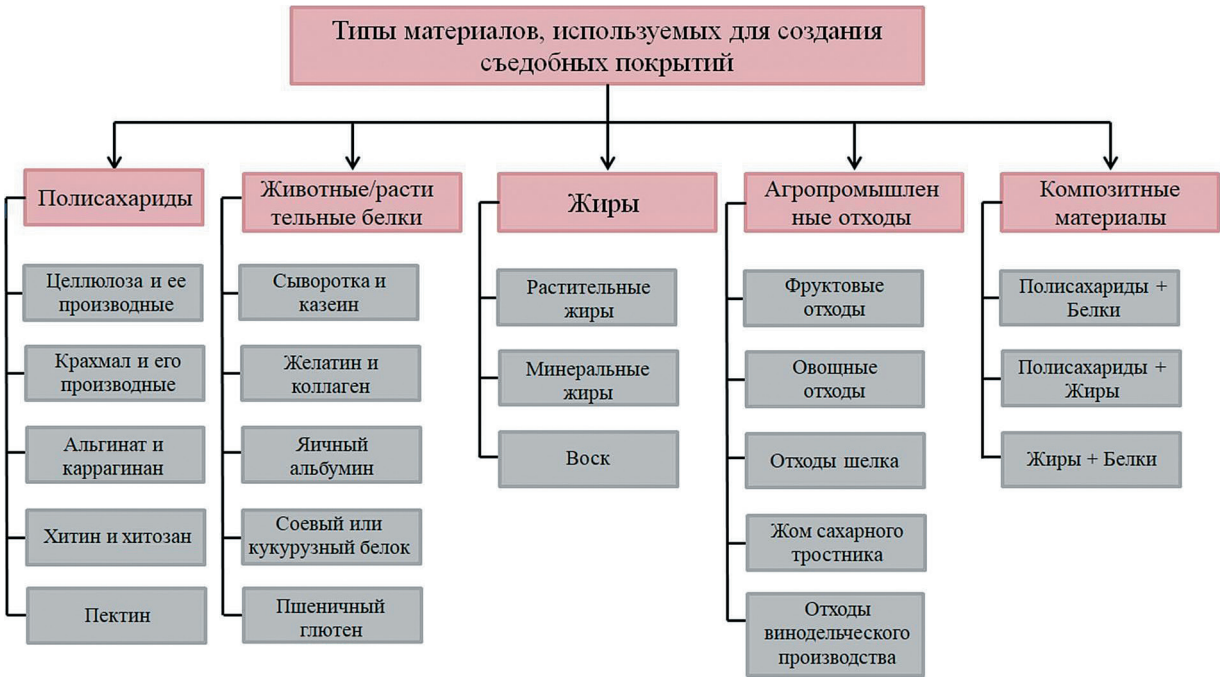



Рисунок 4. **Типы материалов, используемых для создания съедобных покрытий (адаптировано из [37])**
Figure 4. **Types of materials that are used to make edible coatings (adapted from [37])**

## 6. Покрытия на основе полисахаридов

*6.1. Хитозан*

Хитозан является одним из полисахаридов, часто применяемых для создания защитных покрытий на фруктах и овощах, таких как папайя, перец и другие [39,40]. Этот биополимер выделяется среди природных материалов благодаря своей антимикробной активности и биосовместимости, что делает его одним из наиболее перспективных в данной области [41,42]. Покрытие из хитозана способно образовывать барьер, который снижает испарение влаги, интенсивность дыхания и риск заражения микроорганизмами. Например, установлено, что покрытие с концентрацией 0,5 % позволяет сохранять качество черешни и усиливать активность антиоксидантных ферментов на протяжении 24 дней при температуре 10 °C. Кроме того, применение покрытия на основе хитозана и желатина увеличивает срок годности черешни примерно на 10 дней по сравнению с образцами без обработки при температуре 0 °C. Введение натамицина в состав покрытия способно значительно снизить уровень дрожжей и плесневых грибков [43,44,45]. Обработка аскорбиновой кислотой перед нанесением хитозанового покрытия значительно повышает активность антиоксидантных ферментов, что помогает снизить уровень окислительного стресса [46]. В результате удается сохранить содержание сахаров, а также цвет папайи в процессе хранения. Таким образом, сочетание аскорбиновой кислоты и хитозанового покрытия доказало свою эффективность в поддержании качества папайи и в замедлении процессов старения пищевого продукта [47,48].

*6.2. Крахмал*

Крахмал представляет собой полисахарид, состоящий из амилозы и амилопектина. Благодаря своей доступности, крахмал широко применяется в создании покрытий для пищевых продуктов. Проведено множество исследований, направленных на улучшение физико-химических характеристик съедобных покрытий на основе крахмала. Покрытия на основе крахмала не имеют запаха и цвета. Их характеризует низкая способность пропускать кислород, а также матовая и немаслянистая поверхность, что способствует замедлению дыхательных процессов у свежих фруктов и овощей [31,49].

*6.3. Гуммиарабик*

Для формирования съедобных покрытий часто применяют гуммиарабик, натуральный полимер на основе полисахаридов, востребованный в различных отраслях [50]. Основным источником гуммиарабика служат стволы и побеги двух разновидностей акации: *Acacia senegal* и *Acacia seyal*. Состав и характеристики, как физические, так и химические, варьируются в зависимости от конкретного вида [26,51,52,53,54]. Этот гидроколлоидный полисахарид отличается высокой растворимостью и низкой вязкостью. Он востребован в качестве эффективного эмульгатора, стабилизатора и связующего агента. Использование гуммиарабика в качестве пищевого покрытия представляет собой инновационный подход к упаковке, направленный на уменьшение потерь после сбора урожая и на увеличение периода хранения плодоовощной продукции [26,55].

*6.4. Камеди*

Камеди также используют для создания съедобных покрытий [56,57]. Благодаря наличию естественных антимикробных и антиоксидантных компонентов в трагакантовой камеди, ее часто применяют в качестве съедобного покрытия для увеличения срока хранения и поддержания качества томатов и абрикосов после сбора урожая. Это натуральный безопасный и нетоксичный полисахарид. В пищевой промышленности его используют как стабилизатор, эмульгатор, загуститель и жирозаменитель [58,59]. Также использование трагакантовой камеди в качестве покрытия показало, что это перспективный метод продления свежести и срока хранения сладкого перца. После 28-дневного хранения при температуре 8 °C перцы, обработанные данным покрытием, демонстрировали меньшую убыль массы и повышенную упругость. Благодаря способности продлевать срок годности продукта, трагакантовая камедь перспективна для коммерческого использования. Также она обладает высокой эффективностью даже при низких концентрациях [60].

Карбоксиметилцеллюлоза, или целлюлозная камедь — это производное целлюлозы, полученное путем модификации, при которой к молекуле целлюлозы присоединяются карбоксиметильные группы. Исследования показали, что обработка персиков и груш эмульсиями на основе карбоксиметилцеллюлозы увеличивает их срок годности до 12 и 16 дней соответственно. КМЦ как гидрофильный полимер был эффективно использован для создания защитных покрытий на этих фруктах [7,61–63].

Применение ксантановой камеди для покрытий корнеплодов лотоса выявило ее способность подавлять рост бактерий *Bacillus subtilis* [64–66].

## 7. Покрытия на основе белков

Для создания пищевого покрытия на основе белков используют животные белки, такие как коллаген, казеин, желатин и яичный альбумин. Также применяются растительные белки, получаемые из кукурузы, пшеницы, сои, хлопка и арахиса. Эти покрытия эффективно защищают от проникновения газов и помогают удерживать влагу.

*7.1. Глютен*

Глютен представляет собой гидрофобный белок, чаще всего содержащийся в пшенице. Используется для создания съедобных покрытий благодаря своей доступности и низкой стоимости. Такие покрытия отличаются хорошей прозрачностью, а также обладают отличными механическими и барьерными свойствами. Особенности

структуры глютена играют важную роль в формировании пленкообразующих свойств покрытия.

*7.2 Сыворотка и казеин*

Казеины обладают способностью создавать пленки, устойчивые к изменениям pH, температуры и концентрации соли. Такие казеиновые пленки могут использоваться как носители пищевых добавок, включая антиоксиданты, красители или антибактериальные вещества. Для изготовления съедобных казеиновых пленок применяются водные растворы казеината, которые затем высушиваются. В то же время полимеризованные сывороточные белки находят применение в качестве загустителей. Молочные белки способны формировать гибкие, прозрачные и нейтральные на вкус пленки. Для повышения водостойкости казеиновых пленок в качестве сшивающего агента использовалось полифенольное соединение дубильной кислоты, а в пленки на основе сыворотки добавляли миндальное масло [67–69].

## 8. Покрытия на основе липидов

Липидные покрытия применяются для большинства пищевых продуктов. Они помогают уменьшить перенос влаги между компонентами с низкой активностью воды.

*8.1. Воск и парафин*

Из-за своих гидрофобных свойств парафин и пчелиный воск являются наиболее часто применяемыми липидными покрытиями. Они нерастворимы в воде, при этом они растворимы в бензоле, гексане и хлороформе. Это свойство помогает покрытиям блокировать доступ газов, способных повредить ткани пищевых продуктов и усилить процесс потери влаги [70]. Из листьев бразильской пальмы получают карнаубский воск. Его относят к категории восков GRAS (англ. Generally recognized as safe, «общепризнанно безопасно»), что делает его пригодным для использования в пищевой промышленности. Он является самым твердым среди известных восков [71].

## 9. Выводы

В настоящее время разработка инновационных технологий, направленных на совершенствование методов обработки фруктов и овощей после сбора урожая, а также продуктов с минимальной обработкой, приобрела первостепенное значение. Потери фруктов и овощей после сбора урожая существенно ограничивают доступность пищевых продуктов и приводят к ощутимым финансовым убыткам. Возрастают требования к применению экологичных методов послеуборочной обработки фруктов и овощей, а также предпочтения потребителей к продуктам с минимальной обработкой. В связи с этим съедобные покрытия представляют собой перспективное технологическое решение, позволяющее увеличить срок хранения пищевых продуктов, предотвращая их преждевременную порчу. Эти покрытия предоставляют альтернативу обычным упаковочным материалам, сохраняют качественные характеристики продуктов питания, способствуют минимизации потерь после сбора урожая и улучшению функциональных характеристик продуктов питания. Указанные свойства подтверждают значимость съедобных покрытий в качестве экологически чистого и многофункционального решения для продления срока годности пищевых продуктов. При применении съедобных покрытий существует возможность повышения пищевой ценности фруктов и овощей за счет внедрения различных функциональных компонентов в полимерную структуру.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / REFERENCES


1. Cosme, F., Pinto, T., Aires, A., Morais, M. C., Bacelar, E., Anjos, R. et al. (2022). Red fruits composition and their health benefits — a review. *Foods,* 11(5), Article 644. https://doi.org/10.3390/foods11050644
2. Gammage, S., Marangoni, A. G. (2025). Safety of edible coatings on fruits and vegetables. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 24(2), Article e70108. https://doi.org/10.1111/1541-4337.70108
3. 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
4. Miteluț, A. C., Popa, E. E., Draghici, M. C., Popescu, P. A., Popa, V. I., Bujor, O. C. et al. (2021). Latest developments in edible coatings on minimally processed fruits and vegetables: A review. *Foods*, 10(11), Article 2821. https://doi.org/10.3390/foods10112821
5. Yahia, E. M., García-Solís, P., Celis M. E. M. (2019). Contribution of fruits and vegetables to human nutrition and health. Chapter in a book: Postharvest Physiology and Biochemistry of Fruits and Vegetables. Woodhead Publishing, 2019. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813278-4.00002-6
6. Kirci, M., Isaksson, O., Seifert, R. (2022). Managing perishability in the fruit and vegetable supply chains. *Sustainability*, 14(9), Article 5378. https://doi.org/10.3390/su14095378
7. Hazarika, T. K., Lalhriatpuia, C., Ngurthankhumi, R., Lalruatsangi, E., Lalhmachhuani, H. (2023). Edible coatings in extending the shelf life of fruits: A review. *Indian Journal of Agricultural Research*, 57(5), 555–558. https://doi.org/10.18805/IJARe.A-5725
8. Kunwar, A., Bist, D. R., Khatri, L., Dhami, R., Joshi, G. R. (2024). Optimizing post-harvest handling practices to reduce losses and enhance quality of fruits and vegetables. *Food and Agri Economics Review (FAER),* 4(2), 78–82. http://doi.org/10.26480/faer.02.2024.78.82
9. Sandarani, M. D. J. C., Dasanayaka, D. C. M. C. K., Jayasinghe, C. V. L. (2018). Strategies used to prolong the shelf life of fresh commodities. *Journal of Agricultural Science and Food Research*, 9(1), Article 1000206.
10. Pan, J.-N., Sun, J., Shen, Q.-J., Zheng, X., Zhou, W.-W. (2025). Fabrication, properties, and improvement strategies of edible films for fruits and vegetables preservation: A comprehensive review. *Food Innovation and Advances*, 4(1), 43–52. https://doi.org/10.48130/fia-0025-0003
11. Neme, K., Nafady, A., Uddin, S., Tola, Y. B. (2021). Application of nanotechnology in agriculture, postharvest loss reduction and food processing: Food security implication and challenges. *Heliyon,* 7(12), Article e08539. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e08539
12. Elik, A., Yanik, D. K., Istanbullu, Y., Guzelsoy, N. A., Yavuz, A., Gogus, F. (2019). Strategies to reduce post-harvest losses for fruits and vegetables. *International Journal of Scientific and Technological Research,* 5(3), 29–39. https://doi.org/10.7176/JSTR/5-3-04
13. Sanjay, P., Saxena, D., Kazimi, R. (2022). Enhancing shelf life of fresh fruits by the application of different edible coatings. *The Pharma Innovation Journal*, 11(5S), 626–632.
14. Adhikary, T., Singh, S., Sinha, A., Gill, P. P. S. (2020). Recent advances in packaging and edible coating for shelf life enhancement in fruit crops. *Current Journal of Applied Science and Technology,* 39(16), 116–133. https://doi.org/10.9734/cjast/2020/v39i1630744
15. Rajial, H., Varma, S. (2024). Edible coatings: A novel approach to extending the shelf life of fruits and vegetables. *Journal of Advances in Biology and Biotechnology*, 27(7), 25–37. https://doi.org/10.9734/jabb/2024/v27i7963
16. Sapper, M., Palou, L., Pérez-Gago, M. B., Chiralt, A. (2019). Antifungal starch–gellan edible coatings with thyme essential oil for the postharvest preservation of apple and persimmon. *Coatings*, 9(5), Article 333. https://doi.org/10.3390/coatings9050333
17. Dhall, R. K. (2013) Advances in edible coatings for fresh fruits and vegetables: A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 53(5), 435–450. https://doi.org/10.1080/10408398.2010.541568
18. Tang, Y., Mao, R., Guo, S. (2020). Effects of LED spectra on growth, gas exchange, antioxidant activity and nutritional quality of vegetable species. *Life Sciences in Space Research*, 26, 77–84. https://doi.org/10.1016/j.lssr.2020.05.002
19. Hassanzadeh, H., Ahmed, S. A., Qadir, N. S. H. (2025). Application of the active edible film reinforced with nanoparticles and nanoemulsions as the coating systems to improve the quality and shelf life of fruits and vegetables. *Journal of Nanotechnology*, 2025(1), Article 7036931. https://doi.org/10.1155/jnt/7036931
20. Yadav, V., Pal, D., Poonia, A. K. (2024). Edible coatings for enhancing the shelf-life of foods: Meaningful or myth. *Exon,* 1(2), 38–53. https://doi.org/10.69936/en09y0024
21. Banu, A. T., Murugan, A., Lakshmi, D. S. (2022). Edible coatings to enhance shelf life of fruits and vegetables: A mini-review. *Current Nutrition and Food Science,* 18(6), 525–538. https://doi.org/10.2174/1573401318666220303161527
22. Miteluț, A. C., Popa, E. E., Drăghici, M. C., Popescu, P. A., Popa, V. I., Bujor, O.-C. et al. (2021). Latest developments in edible coatings on minimally processed fruits and vegetables: A review. *Foods*, 10(11), Article 2821. https://doi.org/10.3390/foods10112821
23. Chettri, S., Sharma, N., Mohite, A. M. (2023). Edible coatings and films for shelf-life extension of fruit and vegetables. *Biomaterials Advances,* 154, Article 213632. https://doi.org/10.1016/j.bioadv.2023.213632
24. Suresh, S. N., SenthilKumar, P., Pushparaj, C., Sarangi, P. K., Regina, V. R., Subramani, R. (2024). Almond gum-chitosan nanocomposite as edible formulation for advancing postharvest longevity of fruits and vegetables. *Polymers for Advanced Technologies,* 35(6), Article e6453. https://doi.org/10.1002/pat.6453
25. Liyanapathiranage, A., Dassanayake, R. S., Gamage, A., Karri, R. R., Manamperi, A., Evon, P. (2023). Recent developments in edible films and coatings for fruits and vegetables. *Coatings*, 13(7), Article 1177. https://doi.org/10.3390/coatings13071177
26. Tiamiyu, Q. O., Adebayo, S. E., Yusuf, A. A. (2023). Gum Arabic edible coating and its application in preservation of fresh fruits and vegetables: A review. *Food Chemistry Advances*, 2, Article 100251. https://doi.org/10.1016/j.focha.2023.100251
27. de Oliveira, K. A. R., Fernandes K. F. D., de Souza, E. L. (2021). Current advances on the development and application of probiotic-loaded edible films and coatings for the bioprotection of fresh and minimally processed fruit and vegetables. *Foods*, 10(9), Article 2207. https://doi.org/10.3390/foods10092207
28. Perez-Vazquez, A., Barciela, P., Carpena, M., Prieto, M. (2023). Edible coatings as a natural packaging system to improve fruit and vegetable shelf life and quality. *Foods*, 12(19), Article 3570. https://doi.org/10.3390/foods12193570
29. Momin, M., Jamir, A. R, Ankalagi, N., Henny, T., Devi, O. B. (2021). Edible coatings in fruits and vegetables: A brief review. *The Pharma Innovation Journal,* 10(7), 71–78.
30. Patil, V., Shams, R., Dash, K. K. (2023). Techno-functional characteristics, and potential applications of edible coatings: A comprehensive review. *Journal of Agriculture and Food Research*, 14, Article 100886. https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100886

31. Gupta, D., Lall, A., Kumar, S., Patilc, T. D., Gaikwad, K. K. (2024). Plant-based edible films and coatings for food-packaging applications: Recent advances, applications, and trends. *Sustainable Food Technology*, 2(5), 1428–1455. https://doi.org/10.1039/D4FB00110A
32. Valdes, A., Burgos, N., Jimenez, A., Garrigos, M. (2015). Natural pectin polysaccharides as edible coatings. *Coatings*, 5(4), 865–886. https://doi.org/10.3390/coatings5040865
33. Fan, X.-J., Zhang, B., Yan, H., Feng, J.-T., Ma, Z.-Q., Zhang, X. (2019). Effect of lotus leaf extract incorporated composite coating on the postharvest quality of fresh goji (Lycium Barbarum L.) fruit. *Postharvest Biology and Technology*, 148, 132–140. https://doi.org/10.1016/J.POSTHARVBIO.2018.10.020
34. Prakash, A., Baskaran, R., Vadivel V. (2020). Citral nanoemulsion incorporated edible coating to extend the shelf life of fresh cut pineapples. *LWT,* 118, Article 108851. https://doi.org/10.1016/J.LWT.2019.108851
35. Priya, K., Thirunavookarasu, N., Chidanand, D. V. (2023). Recent advances in edible coating of food products and its legislations: A review. *Journal of Agriculture and Food Research,* 12, Article 100623. https://doi.org/10.1016/J.JAFR.2023.100623
36. Lara, G., Yakoubi, S., Villacorta, C. M., Uemura, K., Kobayashi, I., Takahashi, C. et al. (2020). Spray technology applications of xanthan gum-based edible coatings for fresh-cut lotus root (Nelumbo nucifera). *Food Research International,* 137, Article 109723. https://doi.org/10.1016/J.FOODRES.2020.109723
37. Owusu-Akyaw Oduro, K. (2022). Postharvest Technology — Recent Advances, New Perspectives and Applications. IntechOpen, 2022. https://doi.org/10.5772/intechopen.101283
38. Lipin, A. A., Lipin, A. G. (2022). Prediction of coating uniformity in batch fluidized-bed coating process. *Particuology*, 61, 41–46. https://doi.org/10.1016/J.PARTIC.2021.03.010
39. 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
40. 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
41. 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
42. Saberi Riseh, R., 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
43. Zheng, H., Deng, W., Yu, L., Shi, Y., Deng, Y., Wangx, 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
44. Chaudhary, S., Kumar, S., Kumar, V., Sharma, R. (2020). Chitosan nanoemulsions as advanced edible coatings for fruits and vegetables: Composition, fabrication and developments in last decade. *International Journal of Biological Macromolecules*, 152, 154–170. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.02.276
45. 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
46. 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
47. 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
48. 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
49. Seung, D. (2020). Amylose in starch: Towards an understanding of biosynthesis, structure and function. *Open Access*, 228(5), 1490–1504. https://doi.org/https://doi.org/10.1111/nph.16858
50. Zerbet, I., Benidire, L. (2025). Gum Arabic: A Sustainable Biotechnological Solution to Prolong the Shelf Life and Improve Post-Harvest Quality of Fruits. Chapter in a book: Green Chemistry, Sustainable Processes, and Technologies. IGI Global, 2025. https://doi.org/10.4018/979-8-3693-9826-5.ch014
51. Mugo, E. M., Mahungu, S. M., Chikamai, B. N., Mwove, J. (2020). Evaluation of gum arabic from Acacia senegal var kerensis and Acacia senegal var senegal as a stabilizer in low-fat yoghurt. *International Journal of Food Studies*, 9(3), 110–124. https://doi.org/10.7455/ijfs/9.si.2020.a9
52. Huang, Q., Wan, C., Zhang, Y., Chen, C., Chen, J. (2021). Gum arabic edible coating reduces postharvest decay and alleviates nutritional quality deterioration of ponkan fruit during cold storage. *Nutrition and Food Science Technology,* 8, Article 717596. https://doi.org/10.3389/fnut.2021.717596
53. Kathirvelu, T., Xavier, J. R., Innasimuthu, N., Chauhan, O. P. (2024). Exploring composite edible coatings for shelf life extension and quality preservation of tomato (Solanum lycopersicum L.). *Future Postharvest and Food,* 1(4), 401–413. https://doi.org/10.1002/fpf2.12030
54. Qaiser, H., Khalid, M., Noreen, F. (2024). Impact of natural polysaccharides based edible coatings on postharvest physiology and bioburden of Lycopersicon esculentum. *Lahore Garrison University Journal of Life Sciences,* 8(3), 325–340. https://doi.org/10.54692/lgujls.2024.0803349
55. Fawole, O. A., Riva, S., Silue, Y., Opara, U. L. (2024). Evaluating commercial viability of gum Arabic-based edible coatings for enhancing shelf life of "African Delight™" plum under simulated packhouse conditions. *South African Journal of Botany*, 174, 902–915. https://doi.org/10.1016/j.sajb.2024.10.005
56. Tahir, H. E., Xiaobo, Z., Mahunu, G. K., Arslan, M., Abdalhai, M., Zhihua, L. (2019). Recent developments in gum edible coating applications for fruits and vegetables preservation: A review. *Carbohydrate Polymers,* 224, Article 115141. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.115141
57. Salehi, F. (2020). Edible coating of fruits and vegetables using natural gums: A review. *International Journal of Fruit Science,* 20(2), S570–S589. https://doi.org/10.1080/15538362.2020.1746730
58. Boamah, P. O., Afoakwah, N. A., Onumah, J., Osei, E. D., Mahunu, G. K. (2023). Physicochemical properties, biological properties and applications of gum tragacanth-a review. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications,* 5, Article 100288. https://doi.org/10.1016/j.carpta.2023.100288
59. Ali, S., Anjum, M. A., Nawaz, A., Naz, S., Ejaz, S., Sardar, H. et al. (2020). Tragacanth gum coating modulates oxidative stress and maintains quality of harvested apricot fruits. *International Journal of Biological Macromolecules,* 163, 2439–2447. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.09.179
60. Mohebbi, M., Ansarifar, E., Hasanpour, N., Amiryousefi, M. R. (2012). Suitability of aloe vera and gum tragacanth as edible coatings for extending the shelf life of button mushroom. *Food and Bioprocess Technology,* 5(8), 3193–3202. https://doi.org/10.1007/s11947-011-0709-1
61. Panahirad, S., Dadpour, M., Peighambardoust, S. H., Soltanzadeh, M., Gullon, B., Alirezalu, K. et al. (2021). Applications of carboxymethyl cellulose- and pectin-based active edible coatings in preservation of fruits and vegetables: A review. *Trends in Food Science and Technology,* 110, 663–673. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.02.025
62. Dey, P., Bhattacharjee, S., Yadav, D. K., Hmar, B. Z., Gayen, K., Bhowmick, T. K. (2023). Valorization of waste biomass for synthesis of carboxy-methyl-cellulose as a sustainable edible coating on fruits: A review. *International Journal of Biological Macromolecules,* 253(7), Article 127412. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.127412
63. Yilmaz, N. (2025). Xanthan gum and carboxymethyl cellulose-based coating maintain postharvest quality and organic acids of button mushrooms (Agaricus bisporus). *Food Measure,* 19(5), 3741–3753. https://doi.org/10.1007/s11694- 025-03223-8
64. Lara, G., Yakoubi, S., Villacorta, C.M., Uemura, K., Kobayashi, I., Takahashi, C. et. al. (2020). Spray technology applications of xanthan gum-based edible coatings for fresh-cut lotus root (Nelumbo nucifera). *Food Research International*, 137, Article 109723. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109723
65. Mohammadi, M., Rastegar, S., Rohani, A. (2024). Enhancing Mexican lime (Citrus aurantifolia cv.) shelf life with innovative edible coatings: Xanthan gum edible coating enriched with Spirulina platensis and pomegranate seed oils. *BMC Plant Biology*, 24, Article 906(2024). https://doi.org/10.1186/s12870-024-05606-3
66. Chikhala, T., Seke, F., Slabbert, R. M., Sultanbawa, Y., Sivakumar, D. (2024). Utilizing xanthan gum coatings as probiotic bacteria carriers to enhance postharvest quality and antioxidants in fresh-cut cantaloupe and honeydew (Cucumis melo L.) melons. *Foods*, 13(6), Article 940. https://doi.org/10.3390/foods13060940
67. Mihalca, V., Kerezsi, A. D., Weber, A., Gruber-Traub, C., Schmucker, J., Vodnar, D. C., et al. (2021). Protein-based films and coatings for food industry applications. *Polymers*, 13(5), Article 769. https://doi.org/10.3390/polym13050769
68. Galus, S., Kadzińska, J. (2016). Whey protein edible films modified with almond and walnut oils. *Food Hydrocoll*, 52, 78–86. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2015.06.013
69. Picchio, M. L., Linck, Y. G., Monti, G. A., Gugliotta, L. M., Minari, R. J., Igarzabal, C. I. A. (2018). Casein films crosslinked by tannic acid for food packaging applications. *Food Hydrocoll,* 84, 424–434. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2018.06.028
70. Guimarães, M. C., Motta, J. F. G., Madella, D. K. S. F., Moura, L. de A. G., Teodoro, C. E. de S., de Melo, N. R. (2025). Edible coatings used for conservation of minimally processed vegetables: A review. *Research, Society and Development*, 9(8), Article e756986018. https://doi.org/10.33448/rsd-v9i8.6018
71. Milani, J. M., Nemati, A. (2022). Lipid-based edible films and coatings: A review of recent advances and applications. *Journal of Packaging Technology and Research*, 6(1), 11–22. https://doi.org/10.1007/s41783-021-00130-3

| 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<br>142703, Московская обл., Видное, Школьная ул., 78<br>E-mail: n.posokina@fncps.ru<br>ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7857-6785<br>* 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<br>78, Shkol'naya Str., Vidnoe, 142703, Moscow region, Russia<br>E-mail: n.posokina@fncps.ru<br>ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7857-6785<br>* corresponding author |
| Захарова Анна Ивановна — научный сотрудник, лаборатория технологии консервирования, Всероссийский научно-исследовательский институт технологии консервирования<br>142703, Московская обл., Видное, Школьная ул., 78<br>E-mail: a.zaharova@fncps.ru<br>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<br>78, Shkol'naya Str., Vidnoe, 142703, Moscow region, Russia<br>E-mail: a.zaharova@fncps.ru<br>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. | The author has the sole responsibility for writing the manuscript and is 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/10.21323/2618-9771-2025-8-3-362-369

Received 06.01.2025
Accepted in revised 16.08.2025
Accepted for publication 21.08.2025
© Hassan M. A., Salama M., Abd El-Maksoud A.A., 2025

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

# INFLUENCE OF ZINC-WHEY PROTEIN NANOPARTICLES IN FERMENTED MILK ON OXIDATIVE STRESS AND LIVER FUNCTION IN OBESE RATS

Mona A. Hassan[1], Mahmoud Salama[2], Ahmed A. Abd El-Maksoud[3]*

[1] Food Evaluation and Food Science Department, National Organization for Drug Control and Research, Giza, Egypt
[2] Food Science Department, Faculty of Agriculture, Cairo University, Giza, Egypt
[3] Dairy Science Department, Faculty of Agriculture, Cairo University, Giza, Egypt

*KEY WORDS:*
*hepatic enzymes, fermented milk, oxidative stress, zinc-whey protein nanoparticles, malonaldehyde*

ABSTRACT

Obesity refers to fat accumulation in patients' adipose tissue and is widespread globally. It is necessary to develop anti-obesity foods and promote a healthy lifestyle before it reaches epidemic proportions. This study aimed to evaluate the effects of zinc-whey protein nanoparticles (Zn-WPNPs), incorporated into fermented milk (FM), on oxidative stress, inflammation, and liver fibrosis in obese rats. Chemical analysis included the determination of total solids, protein, fat, carbohydrates, ash contents, and pH. Zn efficacy was within 91.22–97.12 %, with particle size within 41.4–228 nm. Zn-WPNPs demonstrated stability after encapsulation, as confirmed by transmission electron microscopy photographs. Moreover, forty female albino rats were divided into five groups and were orally treated for 30 consecutive days: a control group, high-fat diet (HFD; Ch; 1 %), FM alone, FM-Zn, and FM-Zn-WPNPS. Blood and liver samples were then collected for analysis. Highly significant increases in body weight, lipid profile (TG and LDL), and malonaldehyde, along with decreases in the levels of hepatic Ch, HDL, and enzyme activity (AST and ALT) were found in the HFD group. On the other hand, the animals treated with FM-Zn-WPNPs showed reduced levels of all the oxidative stress markers (MDA, CAT, and GSH) to 1.19, 1.89, and 43.25, compared to 2.29, 1.20, and 27.40 in the HFD group, respectively, along with improvements in all the liver measurements. Thus, FM-Zn-WPNPs may serve as an appropriate food for nonalcoholic fatty liver disease (NAFLD) patients to improve their health.

ACKNOWLEDGEMENTS: The authors are grateful to the National Organization for Drug Control and Research for providing research facilities. Authors are thankful to Arla Foods Ingredients Group for providing whey protein isolate..

Поступила 06.01.2025
Поступила после рецензирования 16.08.2025
Принята в печать 21.08.2025
© Хасан М. А., Салама М., Абд Эль-Максуд А.А., 2025

https://www.fsjour.com/jour
Научная статья
Open access

# ВЛИЯНИЕ НАНОЧАСТИЦ ЦИНКА-СЫВОРОТОЧНОГО БЕЛКА В КИСЛОМОЛОЧНОМ ПРОДУКТЕ НА ОКИСЛИТЕЛЬНЫЙ СТРЕСС И ФУНКЦИИ ПЕЧЕНИ У КРЫС С ОЖИРЕНИЕМ

Мона А. Хасан [1], Махмуд Салама [2], Ахмед А. Абд Эль-Максуд [3]*

[1] Отдел оценки пищевых продуктов и науки о продуктах питания,
Национальная организация по контролю за наркотиками и научным исследованиям, Гиза, Египет
[2] Кафедра пищевых наук, сельскохозяйственный факультет, Каирский университет, Гиза, Египет
[3] Кафедра молочных наук, сельскохозяйственный факультет, Каирский университет, Гиза, Египет

*КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:*
*ферменты печени, кисломолочный продукт, окислительный стресс, наночастицы цинка -сывороточного белка, малоновый альдегид*

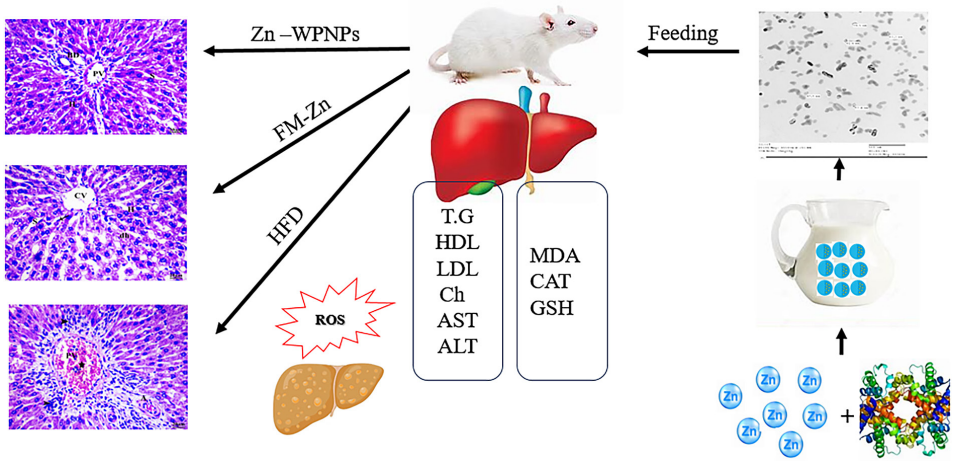
АННОТАЦИЯ

Ожирение характеризуется накоплением жировой ткани в организме человека и широко распространено во всём мире. Необходимо разрабатывать продукты, направленные на борьбу с проблемой ожирения и продвигать здоровый образ жизни пока проблема не достигнет масштабов эпидемии. Целью данного исследования было оценить влияние наночастиц цинка и сывороточного белка (Zn-WPNPs), включённых в состав кисломолочного продукта (FM), на окислительный стресс, воспаление и фиброз печени у крыс с ожирением. Химический анализ включал определение содержания сухих веществ, белка, жира, углеводов, золы и измерение pH. Эффективность связывания цинка составила 91,22–97,12 %, при среднем размере частиц 41,4–228 нм. Zn-WPNPs сохраняли стабильность после инкапсуляции, что было подтверждено фотографиями, полученными с помощью просвечивающей электронной микроскопии. В исследовании использовали 40 самок белых крыс, разделённых на пять групп и получавших пероральное лечение в течение 30 последовательных дней: контрольная группа, группа на высокожировой диете (HFD; холестерин 1 %), FM без добавок, FM-Zn и FM-Zn-WPNPs. После эксперимента у животных отбирали кровь и печень для анализа. В группе HFD наблюдались значительные увеличения массы тела, показателей липидного профиля (триглицеридов и ЛПНП) и малонового диальдегида, а также снижение уровня печёночного холестерина, ЛПВП и активности ферментов (АСТ и АЛТ). В то же время у животных, получавших FM-Zn-WPNPs, уровень всех маркеров окислительного стресса (MDA, CAT и GSH) снизился до 1,19; 1,89 и 43,25 соответственно, по сравнению с 2,29; 1,20 и 27,40 в группе HFD, а также отмечалось улучшение всех печёночных показателей. Таким образом, FM-Zn-WPNPs могут рассматриваться как перспективный продукт питания для пациентов с неалкогольной жировой болезнью печени (НАЖБП), способный улучшать их состояние здоровья.

БЛАГОДАРНОСТИ: Авторы выражают благодарность Национальной организации по контролю и исследованию лекарственных средств (The National Organization for Drug Control and Research) за предоставленные условия и оборудование для проведения исследований. Также авторы благодарят компанию Arla Foods Ingredients Group за предоставленный изолят сывороточного белка.

FOR CITATION: **Hassan, M. A., Salama, M., Abd El-Maksoud, A. A.** (2025). Influence of zinc-whey protein nanoparticles in fermented milk on oxidative stress and liver function in obese rats. *Food Systems,* 8(3), 362–369. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-3-362-369

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: **Хасан, М. А., Салама, М., Абдель-Максуд, А. А.** (2025). Влияние наночастиц цинка-сывороточного белка в кисломолочном продукте на окислительный стресс и функции печени у крыс с ожирением. *Пищевые системы*, 8(3), 362–369. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-3-362-369




**Graphical abstract**

## 1. Introduction

Obesity-related health problems are increasing daily, reaching epidemic levels. It is estimated that over 4 million deaths occur annually due to obesity. In 2022, global statistics of the WHO showed that 2.5 billion adults are overweight, with 890 million of them classified as obese, and by 2024, more than 35 million children were overweight [1]. This concerning trend requires prevention measures; lifestyle and genetic susceptibility play a crucial role in causing obesity, and estimating the cost of obesity-related diseases on healthcare systems suggests it will reach 3 trillion US$ annually by 2030 [2]. Obesity results from energy imbalance and excessive fat accumulation, leading to complications such as nonalcoholic fatty liver disease (NAFLD), inflammation, hyperinsulinemia, hypertension, and cardiovascular disorders [3–5].

NAFLD encompasses a wide range of liver disorders from simple steatosis to nonalcoholic steatohepatitis (NASH) and cirrhosis [6,7]. Excessive calorie intake and high-fat diets significantly contribute to NAFLD, atherosclerosis, and metabolic syndrome [1,5,8]. The chemical composition of dietary fat affects fat oxidation rates and alters low-density/high-density lipoprotein, cholesterol, body weight, and adipocyte morphology [9]. The treatment of NAFLD starts with lifestyle changes, weight loss through diet and exercise, and reducing blood glucose/cholesterol [10]. In addition, oxidative stress (an imbalance between antioxidants and free radicals) plays a key role in NAFLD progression and inflammatory cytokine expression [11]. The recent treatment of obese individuals with type-2 diabetes mellitus is metformin, which contributes to reducing oxidative stress [12]. It offers comparable benefits to polyphenols and antioxidants against oxidative stress, insulin resistance, and liver inflammation [13,14]. Furthermore, prebiotics and probiotics are also used as therapeutic options for NAFLD [15,16].

Milk has an excellent nutritional profile, including protein, carbs, fatty acids, and many vitamins and minerals. It also contains bioactive (linoleic acid, stearic acid, butyric, caprylic, caproic, and capric acids) and functional (β-lactoglobulin, α-lactalbumins, immunoglobulins, lactoferrin, and transferrin) compounds, which are reported to improve human health [17,18]. Rayeb (fermented milk) is one of the popular fermented dairy products (FDPs) in many countries, including Russia, China, Finland, Australia, and the Middle East [19,20]. FDPs are also beneficial for patients who suffer from milk hypersensitivities, lactose intolerance, viral diarrhea, hay fever, stomach flu, and asthma. It has also been used for the treatment of digestive problems, high blood pressure, reducing the risk of diabetes, and helping to prevent cancer [16,21–23].

Moreover, zinc (Zn) is an important signalling molecule involved in human growth and development. It is one of the most common trace elements in the human body [24] and regulates inflammation by reducing inflammatory cytokines [25]. Hence, it reduces oxidative stress and participates in antioxidant enzyme formation [26]. These enzymes serve as biocatalysts in metabolic processes. Furthermore, Zn regulates cell expressions to avoid inflammation. Some studies have shown that Zn lowers blood pressure, reduces harmful cholesterol, and helps to prevent stroke and angina pectoris [25–27]. In addition, zinc is involved in lipid metabolism, which may explain its ability to decrease low-density lipoprotein (LDL) cholesterol and increase high-density lipoprotein (HDL) cholesterol levels [28]. All these effects emphasize the importance of zinc as a protective element against cardiovascular diseases and hypertension [25–27]. Therefore, maintaining a proper diet or using zinc supplements may be beneficial in the prevention and treatment of health issues.

Numerous studies suggest that the bioavailability and efficacy of bioactive compounds could be enhanced through complexation with carrier molecules such as whey proteins (WPs) [29–31]. The combination of whey protein and zinc can be synergistic, as both help to reduce oxidative stress and regulate liver-expressed genes [32]. This dual approach can provide a dietary option for the prevention of diseases. Therefore, this study aims to encapsulate Zn using whey protein nanoparticles through noncovalent interactions and improve its delivery via fermented milk (rich in probiotics) to study the effect of the mixture (FM-Zn-WPNPs) on oxidative stress and liver functions in rats.

## 2. Materials and methods

### *2.1. Materials, chemicals, and kits*

Raw buffalo milk was obtained from the Agriculture Research Station, Cairo University, Egypt. DVS of *Lactobacillus delbrueckii* ssp., *bulgaricus,* and *Streptococcus salivarius* ssp., *thermophilus* were obtained from Chr. Hansen's Lab, Copenhagen, Denmark. Whey protein isolate was purchased from Davisco Foods International Inc., Eden Prairie, Minnesota, USA. Zinc citrate was provided by El Nasr Pharmaceutical Chemicals Co., Cairo, Egypt. 1 % Cholesterol (Ch) was purchased from Sigma Chemical Co., St. Louis, Missouri, USA. The tests for Ch, TG, HDL, and LDL were supplied by FAR Diagnostics Co., Via Fermi, Italy, while MDA, CAT, and GSH assays were from Oxis Research™ Co., USA.

### *2.2. Preparation of zinc loaded whey protein nanoparticles (Zn-WPNPs)*

Whey protein nanoparticles loaded with 7 mg of zinc citrate were prepared and characterized following the method previously reported by Hassan et al. [32].

### *2.3. Skimmed milk preparation*

Raw buffalo milk was obtained and processed using an Alfa Laval separator, Sweden, to obtain skimmed milk. Skimmed milk powder was used for standardization. The prepared skimmed milk was divided into three parts: skimmed milk only, skimmed milk fortified with Zn (10 mg/250 g), and skimmed milk fortified with Zn-WPNPS (10 mg/250 g) according to Kanoni et al. [33]. It was then heat treated for 5 min in a water bath at 85 °C, followed by cooling to 42 °C according to the method described by Hamed et al. [34].

### *2.4. Fermented milk (FM) processing*

Fermented milk was prepared using Tamime and Robinson's method [35]. Skimmed milk was heat treated at 80 °C for 5 minutes and then inoculated with 2 % of the culture. After that, the inoculated milk was divided into three parts: fermented milk only (FM), fermented milk fortified with zinc (FM-Zn), and fermented milk fortified with Zn-WPNPs (FM-Zn-WPNPs). All the samples were incubated at 42 °C until they reached a pH of 4.6. Then, the samples were mixed using an electric stirrer, poured into 100 ml sterile cups, and stored in a refrigerator at 4 °C for subsequent use.

### *2.5. Chemical analysis of FM, FM-Zn, and FM-Zn -WPNPs*

Total solids, ash, pH values, and protein content were determined according to AOAC [36]; total carbohydrate was estimated using the method of DuBois et al. [37].

### *2.6. Determination of Zn content*

Zinc content was determined using Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectroscopy (ICP-AES) at wavelengths 213.857 nm and 206.200 nm, following the method described by Soliman and Hassan [38].

The analysis was performed using an Agilent 5110 ICP-OES system (Agilent Technologies, USA) equipped with a SeaSpray nebulizer and a radial view configuration. Samples were first digested with a mixture of nitric acid ($HNO_3$) and perchloric acid ($HClO_4$) before analysis.

The total zinc efficiency after fermentation with yogurt culture was calculated using the following equation:

$$\text{Zn Efficiency}\,(\%) = \frac{\text{Zn content after fermentation}}{\text{Total added Zn}} \times 100.$$

*2.7. Transmission electron microscopy*

Transmission electron microscopy (TEM) was performed following the procedure described by Soliman and Hassan [38], with minor modifications. Samples were initially fixed by adding glutaraldehyde in a 1:7 (v/v) ratio, then diluted with deionized water at a 1:100 (v/v) ratio. One drop of the diluted sample was placed on a formvar-coated copper grid and allowed to adsorb for 1 minute. Excess fluid was removed, and a 2 % phosphotungstic acid solution (pH 7.2) was added for negative staining. After drying, the samples were examined using a JEOL JEM-1400Plus transmission electron microscope, operated at an accelerating voltage of 80 kV. The mean particle size of the prepared Zn-WPNPs was detected using TEM according to the method of Zhang and Wang [39].

*2.8. Experimental animals*

Animals: 40 female Sprague-Dawley rats, five weeks old and weighing approximately 120 ± 15 g, were obtained from the Animal House Lab, National Organization of Drug Control and Research. The animals were given a standard laboratory diet obtained from Meladco Feed Co., Aubor City, Cairo, and tap water. The animals were kept in cages within suitable rooms free from any source of chemical contamination, thermally controlled (25 ± 10 °C), with a 12-hour light/dark cycle, and humidity (50 ± 5 %) at the Animal House Lab. The rats were treated according to the National Institutes of Health (NIH publication 86–23, revised 1985) and the Animal Care and Use Committee guidelines of the National Research Centre (Committee of general division for Biological Control and Research, No 253, 2021).

*2.9. Experimental design*

After 7 days of acclimatization, 40 Sprague-Dawley albino rats were randomly divided equally into five groups (8 rats per group): Group 1 served as the control and received a basal diet; Group 2 received a high-fat diet (HFD) with 1 % cholesterol; Group 3 was treated with fermented milk (FM) at a dose of 0.5 ml/100 g b. w.; Group 4 was treated with FM fortified with zinc citrate (FM-Zn) at a dose of 50 mg/kg b. w. and Group 5 received FM fortified with zinc-loaded whey protein nanoparticles (FM-Zn-WPNPs) at a dose of 50 mg/kg b. w. All treatments were administered orally for 30 days. Except for the control group, which received only the standard diet, all other groups were fed a high-fat diet (HFD). Body weight was recorded on the first and final days using a digital scale with a precision of two decimal digits (Sartorius, Germany) with an accuracy of ±0.1 grams. All rats were fasted for 12 hours before blood was collected from the retro-orbital venous plexus under diethyl ether anesthesia to analyze lipid profile, liver function parameters, catalase, malonaldehyde, and reduced glutathione [40–42]. The rats were sacrificed by cervical dislocation, and liver samples were obtained. These samples were fixed in formalin (10 %) and then embedded in paraffin. Sections (5 µm) were stained with hematoxylin and eosin for histological evaluation using an Olympus microscope (100X) with a camera [41,43].

*2.10. Statistical analysis*

All data obtained were expressed as mean ± SD. Statistical analysis was performed with SPSS11.5 (SPSS, Inc. © Chicago, IL, USA) by using one-way analysis of variance ANOVA. The difference between the samples was considered significant. All the statements of significance were based on a P-value of < 0.05.

## 3. Results

*3.1. Chemical analysis of fermented milk (FM), FM-Zn, and FM-Zn-WPNPs*

Table 1 shows no significant difference in total solids or carbohydrate content between the FM-Zn and Zn-WPNPs treatments and the control sample. The protein content of the FM-Zn-WPNPs samples significantly increased compared to the FM-Zn sample. Furthermore, FM-Zn has the highest acidity values compared to FM (control) and FM-Zn-WPNPs. Figure 1 shows that FM (control) contains 3.22 mg/kg of zinc. FM-Zn contains 39.32 mg of zinc/kg of FM, while FM-Zn-WPNPs have a total zinc content of 41.26 mg/kg. Our results showed that the efficiency of Zn ranged from 91.22 % to 97.12 %. Besides, significant changes in Zn content after fermentation were observed among all samples (Figure 1). Notably, Zn's efficiency in FM-Zn-WPNPs was the highest (97.12 %) compared to FM and FM-Zn samples.

The results are presented as means, and lowercase letters above the bars indicate significant differences ($p < 0.05$).

*3.2. Transmission electron microscopy (TEM)*

TEM studies were performed on nanoparticles of Zn-WPNPs. As shown in Figure 2, the FM-Zn-WPNPs were nearly spherical, with the dark region representing Zn and the bright region indicating WPNPs [32]. Furthermore, the FM-Zn-WPNPs sample was well dispersed, and no aggregation was observed. However, the particle size showed the diameters of WP particles and Zn elements in nm (Figure 2). In this study, the mean particle size of FM (A), FM-Zn (B), and FM-Zn-WPNPs (C) ranged from 41.4 to 228 nm, with the mean particle size of Zn being was 55.5 nm.

Table 1. **Chemical composition of FM, FM-Zn, and FM-Zn-WPNPs**

Таблица 1. **Химический состав образцов FM, FM-Zn и FM-Zn-WPNPs**

| Samples | Total solids | Protein | Fat | Carbohydrate | Ash | pH |
|---|---|---|---|---|---|---|
| FM | 13.41 ± 0.2$^{a}$ | 5.33 ± 0.18$^{ab}$ | 0.21 ± 0.02$^{ab}$ | 6.7 ± 0.28$^{a}$ | 0.86 ± 0.02$^{b}$ | 4.52 ± 0.11$^{b}$ |
| FM-Zn | 13.11 ± 0.20$^{a}$ | 5.21 ± 0.16$^{b}$ | 0.17 ± 0.0 3$^{b}$ | 6.4 ± 0.35$^{a}$ | 0.97 ± 0.03$^{a}$ | 4.68 ± 0.04$^{a}$ |
| FM-Zn-WPNPs | 13.34 ± 0.18$^{a}$ | 5.53 ± 0.12$^{a}$ | 0.24 ± 0.02$^{a}$ | 6.5 ± 0.18$^{a}$ | 0.97 ± 0.01$^{a}$ | 4.55 ± 0.08$^{ab}$ |

FM: fermented milk; FM-Zn: fermented milk with zinc; FM-Zn-WPNPs: fermented milk with zinc-whey protein nanoparticles; data are presented as mean ± SE. Within each column, values with different lowercase letters differ significantly ($P \leq 0.05$).

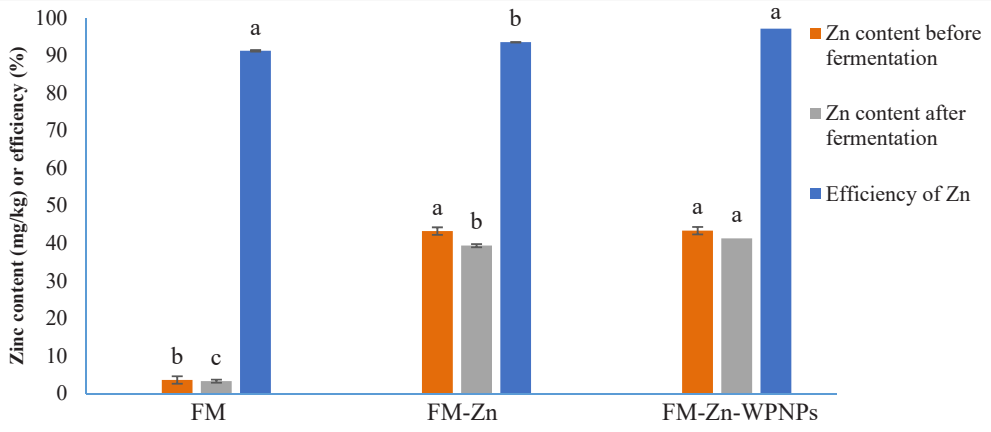



Figure 1. **Zinc content (mg/kg) and efficiency (%) before and after fermentation of milk**

Рисунок 1. **Содержание цинка (мг/кг) и эффективность сохранения цинка (%) после сквашивания молока**

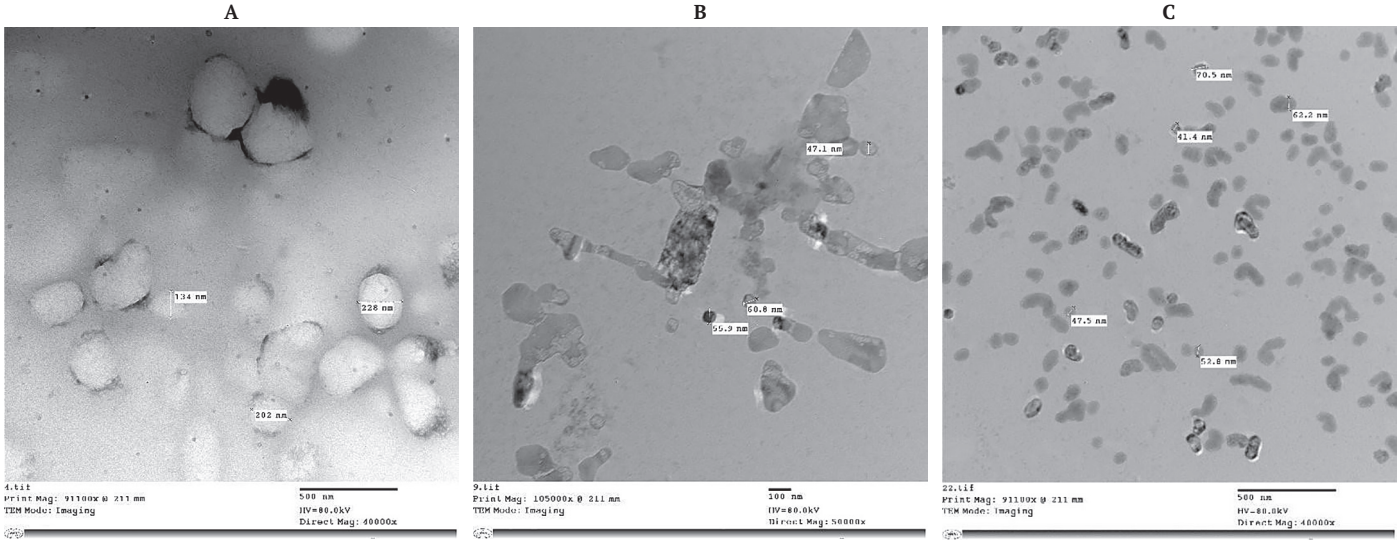



Figure 2. **Transmission electron microscopy (TEM) of FM (A), FM-Zn (B), and FM-Zn-WPNPs (C) after fermentation**

Рисунок 2. **Снимки, полученные методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) образцов FM (A), FM-Zn (B) и FM-Zn-WPNPs (C) после сквашивания**

*3.3. Effects of FM, FM-Zn, and FM-WPNPs on weight gain*

As indicated in Table 2, the HFD-treated group had remarkably higher body weight after 30 days than the control and other treatment groups. The FM and FM-Zn-WPNPs treated groups significantly reduced the body weight gain induced by HFD and undid the HFD-induced obesity alone; the FM-Zn group showed a non-significant effect with HFD. There was no significant difference between the body weight of the FM-Zn-WPNPs administered groups and the control group in this study.

*3.4. Biochemical assays*

As shown in the HFD group (Table 3), there were significantly higher levels of cholesterol, triglycerides, and LDL, while HDL levels significantly decreased. Although HDL showed a significant decline compared to the control and treatment groups, the diets of FM, FM-Zn, and FM-Zn-WPNPs enhanced the lipid profile compared to the HFD group. Furthermore, the group treated with FM-Zn-WPNPs showed the best values for most lipid profile parameters compared to FM or FM-Zn (Table 3).

Hepatic injury was assessed by measuring the activities of liver enzyme markers, which increase in response to hepatic injury. Table 4 shows that AST and ALT levels significantly increased in HFD-fed animals (67.80 and 36.00, respectively) compared to their control and other treatment groups. Treatments with FM, FM-Zn, and FM-Zn-WPNPs showed improvements in all biochemical markers of liver function. It can be observed from the current results (Table 4) that HFD-fed rats experienced a significant reduction in catalase (CAT) and glutathione (GSH) levels (1.20 and 27.40, respectively) compared to the control (1.92 and 47.00, respectively) and other treated groups. In addition, CAT and GSH levels were higher ($p < 0.05$) in the control, FM-Zn-WPNPs, FM-Zn, and FM groups. Moreover, the FM-Zn-WPNPs group showed a significantly greater increase in GSH levels compared to the FM-Zn and FM groups. GSH levels in the FM-Zn-WPNPs, FM-Zn, and FM groups were 57.8 %, 47.8 %, and 49.6 % higher, respectively, than in the HFD group.

Malonaldehyde is used as an indicator of oxidative stress. Current results (Table 4) revealed that HFD-treated rats have significantly higher levels of MDA compared to the control and treated groups (FM, FM-Zn, and FM-Zn-WPNPs). FM, FM-Zn, and FM-Zn-WPNPs showed significant reduction ($p < 0.05$) in MDA, with decreases of 45.4, 44.1, and 48.0 %,

Table 2. **Body weight of albino rats fed with FM, FM-Zn, and FM-Zn-WPNPs**

Таблица 2. **Масса тела крыс-альбиносов, вскармливаемых FM, FM-Zn и FM-Zn-WPNPs**

| Weight (g) | Control | HFD | FM | FM-Zn | FM-Zn-WPNPs |
|---|---|---|---|---|---|
| Initial weight | $131.2 \pm 1.35^{a}$ | $130.4 \pm 1.22^{a}$ | $132.41 \pm 1.04^{a}$ | $120 \pm 0.82^{d}$ | $122.5 \pm 1.16^{bc}$ |
| Final weight | $165.75 \pm 6.07^{bc}$ | $182.5 \pm 5.40^{a}$ | $168.5 \pm 3.81^{bc}$ | $162.67 \pm 6.65^{c}$ | $160 \pm 5.02^{cd}$ |
| Weight gain | $34.54 \pm 5.27^{bc}$ | $52.1 \pm 4.15^{a}$ | $36.09 \pm 3.22^{bc}$ | $42.64 \pm 6.28^{ab}$ | $37.48 \pm 4.52^{bc}$ |

Control: basal diet; HFD: high-fat diet; FM: fermented milk; FM-Zn: fermented milk with zinc; FM-Zn-WPNPs: fermented milk with zinc-whey protein nanoparticles; data are presented as mean ± SE. Within each row, values with different lowercase letters differ significantly ($P \leq 0.05$).

Table 3. **Serum lipid profiles of albino rat groups fed on FM, FM-Zn, and FM-Zn-WPNPs**

Таблица 3. **Липидный профиль сыворотки крови крыс-альбиносов, вскармливаемых FM, FM-Zn и FM-Zn-WPNPs**

| Parameters | Control | HFD | FM | FM-Zn | FM-Zn-WPNPs |
|---|---|---|---|---|---|
| Ch | $93.25 \pm 0.96^{e}$ | $151.2 \pm 3.11^{a}$ | $117.40 \pm 2.19^{b}$ | $113 \pm 1.22^{c}$ | $108.8 \pm 3.56^{d}$ |
| TG | $78 \pm 3.56^{d}$ | $139.6 \pm 3.36^{a}$ | $95.16 \pm 4.24^{c}$ | $102 \pm 2.45^{b}$ | $96.75 \pm 2.63^{c}$ |
| HDL | $49.6 \pm 2.70^{a}$ | $33.2 \pm 2.39^{c}$ | $41.57 \pm 2.70^{b}$ | $50.2 \pm 1.48^{a}$ | $50.43 \pm 1.72^{a}$ |
| LDL | $27.55 \pm 2.60^{d}$ | $90.28 \pm 3.28^{a}$ | $45.01 \pm 3.24^{b}$ | $43.77 \pm 1.59^{bc}$ | $40.48 \pm 1.29^{c}$ |

Control: basal diet; HFD: high-fat diet; FM: fermented milk; FM-Zn: fermented milk with zinc; FM-Zn-WPNPs: fermented milk with zinc-whey protein nanoparticles; data are presented as mean ± SE. Within each row, values with different lowercase letters differ significantly ($P \leq 0.05$).

Table 4. **Effects of FM, FM-Zn, and FM-Zn-WPNPs on liver function, antioxidant enzyme activity, and lipid peroxidation (MDA) in albino rats**

Таблица 4. **Влияние FM, FM-Zn и FM-Zn-WPNPs на функции печени, активность антиоксидантных ферментов и перекисное окисление липидов (по малоновому диальдегиду) у крыс-альбиносов**

| Parameters | Control | HFD | FM | FM-Zn | FM-Zn-WPNPs |
|---|---|---|---|---|---|
| AST | $40.40 \pm 1.03^{c}$ | $67.80 \pm 4.02^{a}$ | $43.25 \pm 1.71^{b}$ | $42.25 \pm 2.21^{bc}$ | $41.75 \pm 1.50^{bc}$ |
| ALT | $19.80 \pm 1.24^{c}$ | $36.00 \pm 1.22^{a}$ | $22.50 \pm 1.29^{b}$ | $21.00 \pm 1.58^{bc}$ | $20.25 \pm 2.22^{bc}$ |
| MDA | $1.12 \pm 0.02^{d}$ | $2.29 \pm 0.02^{a}$ | $1.25 \pm 0.04^{bc}$ | $1.28 \pm 0.03^{b}$ | $1.19 \pm 0.03^{c}$ |
| CAT | $1.92 \pm 0.01^{a}$ | $1.20 \pm 0.02^{c}$ | $1.85 \pm 0.04^{b}$ | $1.87 \pm 0.03^{b}$ | $1.89 \pm 0.03^{ab}$ |
| GSH | $47.00 \pm 0.82^{a}$ | $27.40 \pm 1.52^{d}$ | $41.00 \pm 2.94^{bc}$ | $40.50 \pm 1.29^{c}$ | $43.25 \pm 1.71^{b}$ |

Control: basal diet; HFD: high-fat diet; FM: fermented milk; FM-Zn: fermented milk with zinc; FM-Zn-WPNPs: fermented milk with zinc-whey protein nanoparticles; data are presented as mean ± SE. Within each row, values with different lowercase letters differ significantly ($P \leq 0.05$).

respectively, compared to HFD, indicating suppression of oxidative stress markers caused by high cholesterol in HFD.

*3.5. Histological examination*

Figure 3 and Table 5 represent photomicrographs and parameters of liver sections. Figures 3A and 3B show the control group with standard structure, no histological change, and a clear appearance of the central vein and hepatocyte structure. Hepatocyte nuclei could be identified as dark red bodies within the cells, and the cytoplasm is stained red. The sinusoids, regular portal areas, and parallel hepatic cords that extend from the lobule's periphery to the central vein were visible. In contrast, in the HFD-treated group, shown in Figures 3C, 3D, and 3E, the lobular form was changed, with nuclear disintegration appeared in some places, degeneration of normal hepatic cells, necrosis of liver tissue, and fatty degeneration. The hepatic central vein showed hypertrophy and congestion. Lymphocytes infiltrated the portal area.

The group treated with FM alone is shown in Figures 3F and 3G; mild degeneration was present in some hepatocytes, with some thin, fibrous filaments interposed. There was moderate fatty degeneration, significant infiltration of mononuclear cells, and pyknosis/necrotic changes;

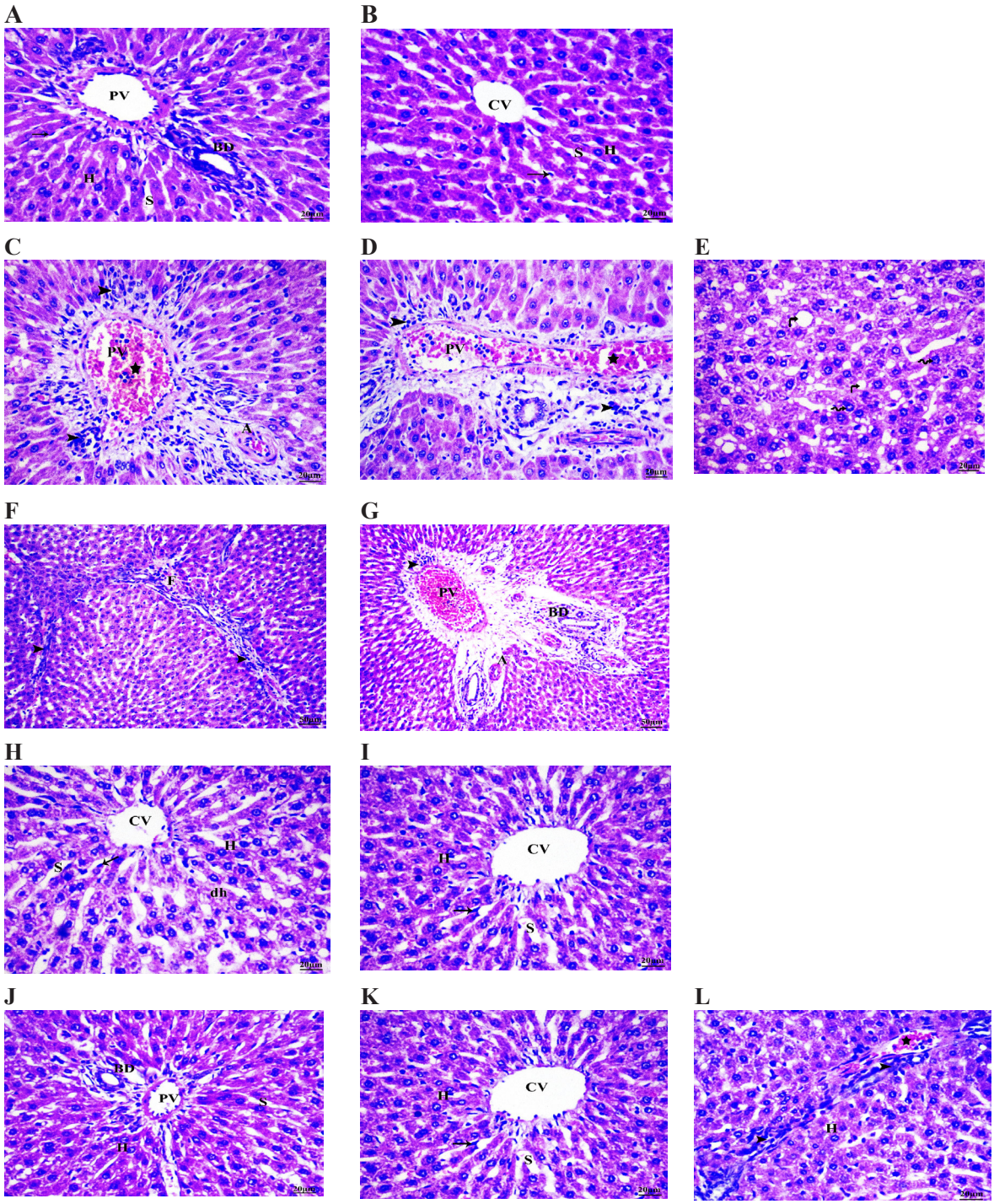



Figure 3. **Photomicrographs of liver sections from rat groups: control (A and B), high-fat diet (C, D, and E), fermented milk (F and G), fermented milk-zinc (H and I), and zinc-whey protein nanoparticles (J, K, and L). Abbreviations, PV, portal vein; BD, bile duct; CV, central vein; H, hepatocyte; A, artery, dh, degenerated hepatocyte; N, necrosis; F, fibrosis; curved arrow, fatty degeneration; Arrow, Kupffer cell; Arrowhead, lymphatic infiltration; Bold arrow, collagen fibers; zigzag arrow, normal hepatocytes; star, congested blood vessel; wavy arrow, karyolysis**

Рисунок 3. **Микрофотографии срезов печени крыс из следующих групп: контрольная (A и B), высокожирная диета (C, D и E), употреблявшие FM (F и G), употреблявшие FM-Zn (H и I) и FM-Zn-WPNPs (J, K и L). Сокращения: PV — портальная вена; BD — желчный проток; CV — центральная вена; H — гепатоцит; A — артерия; dh — гепатоцит с признаками дегенерации; N — некроз; F — фиброз; изогнутая стрелка — жировая дегенерация; стрелка — клетка Купфера; наконечник стрелки — лимфатическая инфильтрация; жирная стрелка — коллагеновые волокна; зигзагообразная стрелка — нормальные гепатоциты; звездочка — застойный кровеносный сосуд; волнистая стрелка — кариолиз**

Table 5. **Effect of fermented milk (FM), FM fortified with Zn, and n-WPNPs on the liver of obese rats**

Таблица 5. **Влияние FM, FM-Zn и Zn-WPNPs на печень крыс с ожирением**

| Groups | Congestion | Lymphatic infiltration | Necrosis | Fatty degeneration | Fibrosis |
|---|---|---|---|---|---|
| Control | - | - | - | - | - |
| HFD | ++ | +++ | +++ | +++ | + |
| FM | + | ++ | + | +++ | + |
| FM-Zn | + | + | - | + | - |
| FM-Zn-WPNPs | + | + | + | + | - |

Control: basal diet; HFD: high-fat diet; FM: fermented milk; FM-Zn: fermented milk with zinc; FM-Zn-WPNPs: fermented milk with zinc-Whey protein nanoparticles; (–) indicates normal, (+) indicates mild, (++) indicates moderate, (+++) indicates high.

congestion was mild. Hepatocytes in the FM-Zn group (Figures 3H and 3I) had a uniform look. Only a few mononuclear cells invade the area. There was no fibrosis present. There were no signs of necrosis, and blood vessels showed only mild constriction. Mild fatty degenerative changes were seen. The hepatic cords were properly aligned around the sinusoids, which looked normal. The FM-Zn-WPNPs group (Figures 3J, 3K, and 3L) showed that hepatocytes and portal components were in a focal state. Mild infiltration of mononuclear cells was present. There was no fibrosis present. Bile ducts were diffusely present. Some hepatocytes exhibit mild necrotic changes. Blood vessels showed mild congestion and fatty degeneration.

## 4. Discussion

Health complications are increasing worldwide [44]. A high-energy diet and a high-fat intake are critical factors in the problem's development. Changes in body weight are considered an essential parameter when evaluating the effects of a high-fat diet in causing obesity and monitoring the treatment of obesity [1,45]. Our study hypotheses that FM, FM-Zn, and FM-Zn-WPNPs impact hepatotoxicity and oxidative stress in HFD-induced rats. Previous studies provided scientific evidence on how milk and dairy products influence body weight and composition, especially FM [20,46]. FM, as a type of dairy product, is considered a favorable and satiating food because of the presence of high-quality protein and essential amino acids. After the entire study period, changes in body weight indicated obesity caused by the HFD. Rats fed with HFD showed an increase in body weight compared to control rats. The addition of FM, FM-Zn, or FM-Zn-WPNPs to the diet of HFD-fed rats led to a significant reduction in final body weight compared to rats that received only HFD. FM, FM-Zn, and FM-Zn-WPNPs showed no significant effect on body weight compared to control rats (basal diet). These results align with studies by Park et al. [46] and ALSuhaymi et al. [47], who found changes in metabolism genes, reduced weight gain, and adipose tissues.

On the other hand, feeding a diet containing short-chain fatty acids (butter) promoted obesity. However, in today's environment, high accessibility to foods with saturated fatty acids may promote the development and maintenance of obesity [48]. Modulation of the gut microbiome and its composition, involving *Lactobacillus plantarum, Lactobacillus curvatus, Lacticaseibacillus rhamnosus, Lactobacillus delbrueckii*, and *Lactobacillus bulgaricus* could be a significant factor in promoting weight loss and mitigating the deleterious impact of obesity [46,47,49].

Intake of dietary fatty acids regulates the content of lipids in muscle through fat metabolites. Moreover, a diet rich in unsaturated fatty acids impairs the accumulation of lipids in muscle cells, while high-fat diets usually contain more saturated fats than other types of diets [50]. In this study, the HFD-fed rats led to an increase in Ch, TG, LDL, and a decrease in HDL parameters in blood serum in a dose-dependent manner compared to the control, FM, FM-Zn, and FM-Zn-WPNPs. Feeding FM in the rats' diet improved the lipid profile (Ch, TG, HDL, and LDL) in FM, FM-Zn, and FM-Zn-WPNPs-fed rats. The results align with Chu et al. [51], who suggested that consuming *L. bulgaricus* powder ($10^8$ CFU) for 12 weeks significantly decreased TG and LDL by modulating the accumulation of LDL/HDL in obese individuals. In addition, zinc supplements affect the lipid profile, as stated in the study by Thoen et al. [52]. They found a reduction in blood TG and insulin levels in obese rats fed zinc supplements (6mg/kg bw).

Moreover, in the present study, HFD-fed rats showed increases in ALT, AST, and MDA, and a significant decrease in CAT and GSH. The results have shown that rats treated with FM-Zn-WPNPs had increased CAT and GSH levels, and significantly decreased levels of ALT, AST, and MDA compared to HFD-rats. Previous studies indicated that the FM-diet (*Streptococcus thermophilus, Lactobacillus acidophilus,* and *Bifidobacterium bifidum*) may prevent obesity-related hepatotoxicity due to bacteria's efficiency in the treatment of liver disorders (ALT and AST), which aligns with our results [53]. In another study by Chu et al. [51]. They found that *Lactobacillus bulgaricus* led to a decrease in AST and no significant change in ALT levels.

On the other hand, the oxidative stress markers (MDA, CAT, and GSH) showed the best values within the FM-Zn-WPNPs group, indicating the positive and synergistic effect of probiotics and zinc matrix against HFD-fed rats. Consumption of FM or multispecies probiotic capsules (*Lactobacillus acidophilus, Bifidobacterium lactis, Lactobacillus casei, L. acidophilus, Lactobacillus rhamnoses, Lactobacillus bulgaricus, Bifidobacterium breve, Bifidobacterium longum, and Streptococcus thermophilus*) for 6 weeks showed enhanced biomarkers of oxidative stress (GSH) in petrochemical workers [54]. Besides, whey protein (immunoglobulins and albumin) protects the liver from obesity-induced damage by acting as an antioxidant and enhancing levels of GSH in tissues [55]. Zinc serves as an enzyme catalyst in fat and carbohydrate metabolism and has a significant role in treating type 2 diabetes, metabolic syndrome, and atherosclerosis [25,56].

Furthermore, dietary supplementation with zinc nanoparticles showed significant increases, along with improvements in the treatment of genotoxicity (3 mg ZnNPs) [57], antidiabetic effects (10 mg ZnNPs), blood glucose levels [58], and TG [59] in rats. Dietary zinc intake in chlorpyrifos-exposed rats demonstrated general improvement in the structural integrity of the liver tissues, supporting the potential of zinc for protection, as the study reports on the role of zinc in reducing chlorpyrifos-induced hepatotoxicity [60].

In our study, HFD-fed animals showed histological changes in the liver, such as necrosis, fatty degeneration, congestion, lymphocyte infiltration, and fibrosis. Moreover, among all treated groups, the best result was observed with FM-Zn-WPNPs (7mg/g), showing a synergistic effect of zinc and whey-nanoparticles. Our results indicated that FM combined with Zn-WPNPs significantly reduced oxidative stress parameters in the liver and was more effective compared to either fermented milk or Zn supplementation alone.

## 5. Conclusion

This study investigated the potential therapeutic effects of FM, FM-Zn, and FM-Zn-WPNPs on obesity, hepatotoxicity, and oxidative stress in HFD-induced obese rats. The findings demonstrated that FM-Zn-WPNPs significantly improved lipid profiles (Ch, TG, HDL, and LDL), liver function biomarkers (AST and ALT), and oxidative stress markers (MDA, CAT, and GSH) compared to the HFD group. FM-Zn-WPNPs showed the therapeutic and protective effects of the synergistic interaction between zinc and the nano-whey protein carrier.

FM-contained probiotics positively affected weight management, confirming their value as a functional food. However, its combination with bioavailable zinc delivered via whey protein nanoparticles reduced hepatic damage and NAFLD by combating reactive oxygen species and LDL. The findings suggest that FM-Zn-WPNPs may be a promising dietary strategy for preventing or managing obesity-associated liver dysfunction and oxidative stress. Further clinical research is required to confirm these results in humans and study the mechanisms of action.

## REFERENCES


1. World Health Organization. (2025). Obesity and overweight. Retrieved from https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/obesity-and-overweight Accessed July 14, 2025.
2. World Obesity Federation. (2022). The Economic Impact of Overweight Obesity. Retrieved from https://data.worldobesity.org/publications/WOF-Economic-Impacts-2-V2.pdf Accessed July 14, 2025.
3. Öner-İyidoğan, Y., Koçak, H., Seyidhanoğlu, M., Gürdöl, F., Gülçubuk, A., Yildirim, F. et al. (2013). Curcumin prevents liver fat accumulation and serum fetuin — A increase in rats fed a high-fat diet. *Journal of Physiology and Biochemistry*, 69(4), 677–686. https://doi.org/10.1007/s13105-013-0244-9
4. Ragab, S. M. M., Abd Elghaffar, S. K., El-Metwally, T. H., Badr, G., Mahmoud, M. H., Omar, H. M. (2015). Effect of a high fat, high sucrose diet on the promotion of

non-alcoholic fatty liver disease in male rats: The ameliorative role of three natural compounds. *Lipids in Health and Disease*, 14(1), Article 83. https://doi.org/10.1186/s12944-015-0087-1
5. Petrie, J. R., Guzik, T. J., Touyz, R. M. (2018). Diabetes, hypertension, and cardiovascular disease: Clinical insights and vascular mechanisms. *Canadian Journal of Cardiology*, 34(5), 575–584. https://doi.org/10.1016/j.cjca.2017.12.005
6. Grundy, S. M. (2006). Atherogenic dyslipidemia associated with metabolic syndrome and insulin resistance. *Clinical Cornerstone*, 8(Suppl 1), S21-S27. https://doi.org/10.1016/S1098-3597(06)80005-0
7. Castro-Barquero, S., Ruiz-León, A. M., Sierra-Pérez, M., Estruch, R., Casas, R. (2020). Dietary strategies for metabolic syndrome: A comprehensive review. *Nutrients*, 12(10), Article 2983. https://doi.org/10.3390/nu12102983
8. Ulla, A., Alam, M. A., Sikder, B., Sumi, F. A., Rahman, M. M., Habib, Z. F. et al. (2017). Supplementation of *Syzygium cumini* seed powder prevented obesity, glucose intolerance, hyperlipidemia and oxidative stress in high carbohydrate high fat diet induced obese rats. *BMC Complementary and Alternative Medicine*, 17(1), Article 289. https://doi.org/10.1186/s12906-017-1799-8
9. Anders, L. C., Yeo, H., Kaelin, B. R., Lang, A. L., Bushau, A. M., Douglas, A. N. et al. (2016). Role of dietary fatty acids in liver injury caused by vinyl chloride metabolites in mice. *Toxicology and Applied Pharmacology*, 311, 34–41. https://doi.org/10.1016/j.taap.2016.09.026
10. Zelber-Sagi, S., Moore, J. B. (2024). Practical lifestyle management of nonalcoholic fatty liver disease for busy clinicians. *Diabetes Spectrum*, 37(1), 39–47. https://doi.org/10.2337/dsi23-0009
11. Coelho, D. F., Pereira-Lancha, L. O., Chaves, D. S., Diwan, D., Ferraz, R., Campos-Ferraz, P. L. et al. (2011). Effect of high-fat diets on body composition, lipid metabolism and insulin sensitivity, and the role of exercise on these parameters. *Brazilian Journal of Medical and Biological Research*, 44(10), 966–972. https://doi.org/10.1590/S0100-879X2011007500107
12. Hoey, H., Roche, E. (2024). Obesity a triple pandemic, the trillion dollar disease: Prevention is imperative. *Global Pediatrics*, 7, Article 100141. https://doi.org/10.1016/j.gpeds.2024.100141
13. Naghdi, A., Goodarzi, M. T., Karimi, J., Hashemnia, M., Khodadadi, I. (2022). Effects of curcumin and metformin on oxidative stress and apoptosis in heart tissue of type 1 diabetic rats. *Journal of Cardiovascular and Thoracic Research*, 14(2), 128–137. https://doi.org/10.34172/jcvtr.2022.23
14. Yan, Y., Jun, C., Lu, Y., Jiangmei, S. (2019). Combination of metformin and luteolin synergistically protects carbon tetrachloride-induced hepatotoxicity: Mechanism involves antioxidant, anti-inflammatory, antiapoptotic, and Nrf2/HO-1 signaling pathway. *BioFactors*, 45(4), 598–606. https://doi.org/10.1002/biof.1521
15. Bovi, A.P.D., Marciano, F., Mandato, C., Siano, M. A., Savoia, M., Vajro, P. (2021). Oxidative stress in non-alcoholic fatty liver disease. An updated mini review. *Frontiers in Medicine*, 8, Article 595371. https://doi.org/10.3389/fmed.2021.595371
16. Naeem, H., Hassan, H. U., Shahbaz, M., Imran, M., Memon, A. G., Hasnain, A. et al. (2024). Role of probiotics against human cancers, inflammatory diseases, and other complex malignancies. *Journal of Food Biochemistry*, 2024, Article 6632209. https://doi.org/10.1155/2024/6632209
17. Miller, G. D., Jarvis, J. K., McBean, L. D. (2006). Handbook of Dairy Foods and Nutrition. CRC Press, 2006. https://doi.org/10.1201/9781420004311
18. Fox, P. F., McSweeney, P. L. (1998). Dairy chemistry and biochemistry. Blackie Academic and Professional, 1998.
19. Kolokolova, A. Y., Kishilova, S. A., Rozhkova, I. V., Mitrova, V. A. (2024). The Role of postbiotic composition in the growth stimulating of bifidobacteria. *FOOD METAENGINEERING*, 2(2), 12–21. https://doi.org/10.37442/fme.2024.2.56 (In Russian)
20. Tamang, J. P., Cotter, P. D., Endo, A., Han, N. S., Kort, R., Liu, S. Q. et al. (2020). Fermented foods in a global age: East meets West. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 19(1), 184–217. https://doi.org/10.1111/1541–4337.12520
21. Patel, P., Butani, K., Kumar, A., Singh, S., Prajapati, B. G. (2023). Effects of fermented food consumption on non-communicable diseases. *Foods*, 12(4), Article 687. https://doi.org/10.3390/foods12040687
22. Kaur, H., Kaur, G., Ali, S. A. (2022). Dairy-based probiotic-fermented functional foods: An update on their health-promoting properties. *Fermentation*, 8(9), Article 425. https://doi.org/10.3390/fermentation8090425
23. Stachelska, M. A., Karpiński, P., Kruszewski, B. (2025). Health-promoting and functional properties of fermented milk beverages with probiotic bacteria in the prevention of civilization diseases. *Nutrients,* 17(1), Article 9. https://doi.org/10.3390/nu17010009
24. Hara, T., Yoshigai, E., Ohashi, T., Fukada, T. (2022). Zinc transporters as potential therapeutic targets: An updated review. *Journal of Pharmacological Sciences*, 148(2), 221–228. https://doi.org/10.1016/j.jphs.2021.11.007
25. Patil, R., Sontakke, T., Biradar, A., Nalage, D. (2023). Zinc: An essential trace element for human health and beyond. *Food and Health*, 5(3), Article 13. https://doi.org/10.53388/fh2023013
26. Luan, R., Ding, D., Xue, Q., Li, H., Wang, Y., Yang, J. (2023). Protective role of zinc in the pathogenesis of respiratory diseases. *European Journal of Clinical Nutrition*, 77(4), 427–435. https://doi.org/10.1038/s41430-022-01191-6
27. Hara, T., Yoshigai, E., Ohashi, T., Fukada, T. (2023). Zinc in cardiovascular functions and diseases: epidemiology and molecular mechanisms for therapeutic development. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(8), Article 7152. https://doi.org/10.3390/ijms24087152
28. Long, Q., Feng, Y., Chen, F., Wang, W., Ma, M., Mao, S. (2022). Association between serum zinc level and lipid profiles in children with spinal muscular atrophy. *Frontiers in Nutrition*, 9, Article 960006. https://doi.org/10.3389/fnut.2022.960006
29. Luparelli, A., Trisciuzzi, D., Schirinzi, W. M., Caputo, L., Smiriglia, L., Quintieri, L. et al. (2025). Whey proteins and bioactive peptides: Advances in production, selection and bioactivity profiling. *Biomedicines*, 13(6), Article 1311. https://doi.org/10.3390/biomedicines13061311
30. Jiang, L., Zhang, Z., Qiu, C., Wen, J. (2024). A review of whey protein-based bioactive delivery systems: design, fabrication, and application. *Foods*, 13(15), Article 2453. https://doi.org/10.3390/foods13152453
31. El-Maksoud, A. A. A., Korany, R. M. S., El-Ghany, I. H. A., El-Beltagi, H. S., de Gouveia, G. M. A. F. (2020). Dietary solutions to dyslipidemia: Milk protein–polysaccharide conjugates as liver biochemical enhancers. *Journal of Food Biochemistry*, 44(3), Article e13142. https://doi.org/10.1111/jfbc.13142
32. Hassan, M. A., El-Nekeety, A. A., Abdel-Aziem, S. H., Hassan, N. S., Abdel-Wahhab, M. A. (2019). Zinc citrate incorporation with whey protein nanoparticles alleviate the oxidative stress complication and modulate gene expression in the liver of rats. *Food and Chemical Toxicology*, 125, 439–451. https://doi.org/10.1016/j.fct.2019.01.026
33. Kanoni, S., Dedoussis, G. V., Herbein, G., Fulop, T., Varin, A., Jajte, J. et al. (2010). Assessment of gene–nutrient interactions on inflammatory status of the elderly with the use of a zinc diet score — ZINCAGE study. *The Journal of Nutritional Biochemistry*, 21(6), 526–531. https://doi.org/10.1016/j.jnutbio.2009.02.011
34. Hamed, A. M., Taha, S. H., Darwish, A. A., Aly, E. (2021). Antioxidant activity and some quality characteristics of buffalo yoghurt fortified with peanut skin extract powder. *Journal of Food Science and Technology*, 58(6), 2431–2440. https://doi.org/10.1007/s13197-020-04835-2
35. Tamime, A. Y., Robinson, R. K. (2007). Tamime and Robinson's yoghurt: Science and technology. Woodhead Publishing-Elsevier, 2007.
36. AOAC. (2005). Association of Official Analytical Chemists, Official Methods of Analysis of AOAC international, 18th Edition, Published by AOAC international Maryland, USA. 2005.
37. DuBois, M., Gilles, K. A., Hamilton, J. K., Rebers, P. A., Smith, F. (1956). Colorimetric method for determination of sugars and related substances. *Analytical Chemistry*, 28(3), 350–356. https://doi.org/10.1021/ac60111a017
38. Soliman, T. N., Hassan, M. A. E. F. (2018). Preparation and characterization of sustained released zinc citrate encapsulated in whey protein nanoparticles. *Pakistan Journal of Biological Sciences*, 21(9), 448–453. https://doi.org/10.3923/pjbs.2018.448.453
39. Zhang, S., Wang, C. (2023). Precise analysis of nanoparticle size distribution in TEM image. *Methods and Protocols*, 6(4), Article 63. https://doi.org/10.3390/mps6040063
40. Konecny, F. (2021). Rodent general anesthesia suitable for measurement of experimental invasive hemodynamics. *European Journal of Biology and Biotechnology*, 2(4), 33–43. https://doi.org/10.24018/ejbio.2021.2.4.259
41. McClure, D. E. (1999). Clinical pathology and sample collection in the laboratory rodent. *Veterinary Clinics of North America: Exotic Animal Practice*, 2(3), 565–590. https://doi.org/10.1016/S1094-9194(17)30111-1
42. Plate, A. Y. A., Crankshaw, D. L., Gallaher, D. D. (2005). The effect of anesthesia by diethyl ether or isoflurane on activity of cytochrome P450 2E1 and P450 reductases in rat liver. *Anesthesia and Analgesia*, 101(4), 1063–1064. https://doi.org/10.1213/01.ane.0000166791.30963.ef
43. Suvarna, S.K., Layton, C., John D. Bancroft, J.D. (2019). Bancroft's Theory and Practice of Histological Techniques. Elsevier Ltd, 2019. https://doi.org/10.1016/C2015-0-00143-5
44. World Health Organization. (2024). Noncommunicable diseases. Retrieved from https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/noncommunicable-diseases Accessed July 14, 2025.
45. Farhana, A., Rehman, A. (2023). Metabolic consequences of weight reduction. In StatPearls [Internet]. Treasure Island (FL). StatPearls Publishing. Retrieved from https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK572145/ Accessed July 14, 2025.
46. Park, D. -Y., Ahn, Y. -T., Park, S. -H., Huh, C. -S., Yoo, S. -R., Yu, R. et al. (2013). Supplementation of *Lactobacillus curvatus* KY1032 in diet-induced obese mice is associated with gut microbial changes and reduction in obesity. *PLoS ONE*, 8(3), Article e59470. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0059470
47. ALSuhaymi, N., Darwish, A. M., Khattab, A. E.-N. (2023). Assessment of two potential probiotic strains as anti-obesity supplements under high-fat feeding conditions. *Probiotics and Antimicrobial Proteins*, 15(4), 856–867. https://doi.org/10.1007/s12602-022-09912-w
48. Younossi, Z. M., Zelber-Sagi, S., Henry, L., Gerber, L. H. (2023). Lifestyle interventions in nonalcoholic fatty liver disease. *Nature Reviews Gastroenterology and Hepatology*, 20(11), 708–722. https://doi.org/10.1038/s41575-023-00800-4
49. Koutnikova, H., Genser, B., Monteiro-Sepulveda, M., Faurie, J. -M., Rizkalla, S., Schrezenmeir, J. et al. (2019). Impact of bacterial probiotics on obesity, diabetes and non-alcoholic fatty liver disease related variables: A systematic review and meta-analysis of randomised controlled trials. *BMJ Open*, 9(3), Article e017995. https://doi.org/10.1136/bmjopen-2017-017995
50. Timmers, S., den Bosch, J. de V-v., de Wit, N., Schaart, G., van Beurden, D., Hesselink, M. et al. (2011). Differential effects of saturated versus unsaturated dietary fatty acids on weight gain and myocellular lipid profiles in mice. *Nutrition and Diabetes*, 1(7), Article e11. https://doi.org/10.1038/nutd.2011.7
51. Chu, P.-Y., Yu, Y.-C., Pan, Y.-C., Dai, Y.-H., Yang, J.-C., Huang, K.-C. et al. (2024). The efficacy of lactobacillus delbrueckii ssp. bulgaricus supplementation in managing body weight and blood lipids of people with overweight: A randomized pilot trial. *Metabolites*, 14(2), Article 129. https://doi.org/10.3390/metabo14020129
52. Thoen, R. U., Barther, N. N., Schemitt, E., Bona, S., Fernandes, S., Coral, G. et al. (2019). Zinc supplementation reduces diet-induced obesity and improves insulin sensitivity in rats. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism*, 44(6), 580–586. https://doi.org/10.1139/apnm-2018-0519
53. Refaat, O. G., Arafa, M. A., Rabeh, N. M., Sabra, R. S. (2020). Biological evaluation of probiotic fermented milk (RAYEB) on obese rats. *Egyptian Journal of Applied Science*, 35(9), 85–102. https://doi.org/10.21608/ejas.2020.128871
54. Mohammadi, A.A., Jazayeri, S., Khosravi-Darani, K., Solati, Z., Mohammadpour, N., Asemi, Z. et al. (2015). Effects of probiotics on biomarkers of oxidative stress and inflammatory factors in petrochemical workers: A randomized, double-blind, placebo-controlled trial. *International Journal of Preventive Medicine*, 6(1), Article 82. https://doi.org/10.4103/2008-7802.164146
55. Bayram, T., Pekmez, M., Arda, N., Yalçın, A. S. (2008). Antioxidant activity of whey protein fractions isolated by gel exclusion chromatography and protease treatment. *Talanta*, 75(3), 705–709. https://doi.org/10.1016/j.talanta.2007.12.007

56. Jin, D., Wei, X., He, Y., Zhong, L., Lu, H., Lan, J. et al. (2024). The nutritional roles of zinc for immune system and COVID-19 patients. *Frontiers in Nutrition*, 11, Articl 1385591. https://doi.org/10.3389/fnut.2024.1385591
57. El-Maddawy, Z. K., Abd El Naby, W. S. H. (2019). Protective effects of zinc oxide nanoparticles against doxorubicin induced testicular toxicity and DNA damage in male rats. *Toxicology Research*, 8(5), 654–662. https://doi.org/10.1039/c9tx00052f
58. Alkaladi, A., Abdelazim, A. M., Afifi, M. (2014). Antidiabetic activity of zinc oxide and silver nanoparticles on streptozotocin-induced diabetic rats. *International Journal of Molecular Sciences*, 15(2), 2015–2023. https://doi.org/10.3390/ijms15022015
59. Rahman, H. S., Othman, H. H., Abdullah, R., Edin, H. Y. A. S., AL-Haj, N. A. (2022). Beneficial and toxicological aspects of zinc oxide nanoparticles in animals. *Veterinary Medicine and Science*, *8*(4), 1769–1779. https://doi.org/10.1002/vms3.814
60. Goel, A., Dani, V., Dhawan, D. K. (2005). Protective effects of zinc on lipid peroxidation, antioxidant enzymes and hepatic histoarchitecture in chlorpyrifos-induced toxicity. *Chemico-Biological Interactions*, 156(2–3), 131–140. https://doi.org/10.1016/j.cbi.2005.08.004

| AUTHOR INFORMATION | СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ |
|---|---|
| **Affiliation** | **Принадлежность к организации** |
| **Mona A. Hassan**, Assistant Professor, Food Evaluation and Food Science Department, National Organization for Drug Control and Research<br>51 Wezaret El-Zeraa Street, Agouza, 12654, Giza, Egypt<br>E-mail: monasaa2016@gmail.com<br>ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8423-6066 | **Мона А. Хассан** — ассистент-профессор, Отдел оценки пищевых продуктов и науки о продуктах питания, Национальная организация по контролю за наркотиками и научным исследованиям<br>12654, Египет, Гиза, Агоуза, ул. Везарет Эль-Зераа, 51<br>E-mail: monasaa2016@gmail.com<br>ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8423-6066 |
| **Mahmoud Salama**, Assistant Professor, Food Science Department, Faculty of Agriculture, Cairo University<br>1 Gamaa Street, 12613, Giza, Egypt<br>E-mail: mahmoudsalama2100@agr.cu.edu.eg<br>ORCID: https://orcid.org/0000–0002–8486–0360 | **Салама Махмуд** — ассистент-профессор, кафедра пищевых наук, сельскохозяйственный факультет, Каирский университет<br>12613, Египет, Гиза, ул. Гамаа, 1<br>E-mail: mahmoudsalama2100@agr.cu.edu.eg<br>ORCID: https://orcid.org/0000–0002–8486–0360 |
| **Ahmed A. Abd El-Maksoud**, Associate Professor, Department of Dairy Science, Faculty of Agriculture, Cairo University<br>1 Gamaa Street, 12613, Giza, Egypt<br>E-mail: ahmed_ali@cu.edu.eg<br>ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6631-5900<br>* corresponding author | **Ахмед А. Абдель-Максуд** — Адъюнкт-Профессор, кафедра молочных наук, сельскохозяйственный факультет, Каирский университет, Египет<br>12613, Египет, Гиза, ул. Гамаа, 1<br>E-mail: ahmed_ali@cu.edu.eg<br>ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6631-5900<br>* автор для контактов |
| **Contribution** | **Критерии авторства** |
| Authors are 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/10.21323/2618-9771-2025-8-3-370-377

Поступила 28.05.2025
Поступила после рецензирования 13.08.2025
Принята в печать 18.08.2025
© Ландиховская А. В., Творогова А. А., Королев И. А., 2025
https://www.fsjour.com/jour
Научная статья
Open access

# ВЛИЯНИЕ ЗАМЕНИТЕЛЕЙ САХАРОЗЫ НА ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА МОРОЖЕНОГО В ПРОЦЕССЕ ПРОИЗВОДСТВА И ХРАНЕНИЯ

Ландиховская А. В.*, Творогова А. А., Королев И. А.

Всероссийский научно-исследовательский институт холодильной промышленности, Москва, Россия

*КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:*
*фруктоза, трегалоза, полиолы, инулин, структура, теплофизические свойства*

АННОТАЦИЯ

Избыточное потребление сахарозы является общемировой проблемой системы здравоохранения. Для полной замены сахарозы в мороженом нужно использовать 14–16 % других ингредиентов, что может отразиться на показателях качества готового продукта. Целью исследований являлось проведение в процессе производства и хранения сравнительной оценки показателей качества мороженого традиционного и с заменой сахарозы на композиции заменителей, снижающих гликемический индекс готового продукта. Использовались современные методы исследований: химические, структурно-механические, микроструктурные и дифференциальной сканирующей калориметрии. Объектами исследований являлись образцы мороженого с заменой сахарозы на композицию мальтита и инулина, эритрита и инулина, фруктозы и трегалозы (в соотношении 4:3 и 3:4), фруктозы или трегалозы с инулином. Установлено, что в экспериментальных образцах мороженого по сравнению с контрольным (с содержанием сахарозы 14 %) гликемический индекс уменьшился в 1,4–4,5 раза. При замене сахарозы на композицию инулина и полиолов калорийность мороженого снизилась на 30 %. Значения вязкости смеси в образцах с эритритом и инулином, а также с фруктозой и трегалозой (при соотношении 3:4) не отличались от контрольного образца. Наиболее мягкая консистенция среди опытных образцов отмечена при доминировании фруктозы в композиции с трегалозой, наиболее твердая — у образца с эритритом и инулином. Исследования теплофизических свойств мороженого показали, что применение эритрита в композиции с инулином вызывает существенное снижение температур стеклования, замерзания и криоскопической температуры, что отрицательно сказывается на консистенции продукта. Теплофизические свойства, наиболее близкие к показателям контрольного образца мороженого с сахарозой, демонстрировали образцы с мальтитом и инулином и образцы с трегалозой и инулином. Установлено, что в наибольшей степени снизилась дисперсность кристаллов льда в образцах с мальтитом и инулином, а также с фруктозой и инулином: размеры кристаллов через 3 месяца хранения увеличились на 15 и 21 % соответственно. Установлено, что внесение фруктозы и инулина, фруктозы и трегалозы увеличивает продолжительность индукционного периода окисления жира на 11 ч по сравнению с контрольным образцом. Исследования показали, что полная замена сахарозы на ингредиенты с отличной молекулярной массой, в частности на эритрит и инулин, приводит к заметному изменению потребительских и технологических свойств продукта.

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 28.05.2025
Accepted in revised 13.08.2025
Accepted for publication 18.08.2025
© Landikhovskaya A. V., Tvorogova A. A., Korolev I. A., 2025
Available online at https://www.fsjour.com/jour
Original scientific article
Open access

# INFLUENCE OF SUCROSE SUBSTITUTES ON THE QUALITY INDICATORS OF ICE CREAM IN THE PROCESS OF PRODUCTION AND STORAGE

Anna V. Landikhovskaya*, Antonina A. Tvorogova, Igor A. Korolev

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

*KEY WORDS:*
*fructose, trehalose, polyols, inulin, structure, thermophysical properties*

ABSTRACT

Overconsumption of sucrose is a global problem in the health care system. In order to replace it in ice cream completely, it is necessary to use 14–16 % of other ingredients which can affect quality indicators of a finished product. The aim of the study was a comparative assessment of quality indicators of traditional ice cream and ice cream with sucrose replaced by a composition of substitutes that reduce the glycemic index of the finished product. The study was carried out during the production process and storage. Modern research methods were used: chemical, structural-mechanical, microstructural and differential scanning calorimetry. Ice cream samples with sucrose replaced by a composition of maltitol and inulin, erythriol and inulin, fructose or trehalose (in a ratio of 4:3 and 3:4), fructose or trehalose with inulin were the objects of the study. It has been established that the glycemic index decreased by 1.4–4.5 times in the experimental ice cream samples compared to the control (14 % sucrose). With replacement of sucrose by the composition of inulin and polyols, the caloric content of ice cream decreased by 30 %. The viscosity values of the mixtures with erythritol, as well as with fructose and trehalose (with a ratio of 3:4) were not different from the control sample. Among the experimental samples, the softest consistency was noticed with the domination of fructose in the composition with trehalose, and the hardest one was in the sample with erythritol and inulin. Studies of thermophysical properties of ice cream have shown that the use of erythritol in the composition with inulin causes a significant decrease in the glass transition, freezing and cryoscopic temperatures, which negatively affects the consistency of the product. The samples with maltitol and inulin, and the samples with trehalose and inulin demonstrated thermophysical properties that were the closest to the control sample of ice cream. It has been established that the dispersion of ice crystals decreased most in the samples with maltitol and inulin, as well as with fructose and inulin: crystal sizes increased by 15 and 21 %, respectively, after 3 months of storage. It has been found that the introduction of fructose and inulin, fructose and trehalose increases the duration of the induction period of fat oxidation

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: **Ландиховская, А. В., Творогова, А. А., Королев, И. А.** (2025). Влияние заменителей сахарозы на показатели качества мороженого в процессе производства и хранения. *Пищевые системы*, 8(3), 370–377. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-3-370-377

FOR CITATION: **Landikhovskaya, A. V., Tvorogova, A. A., Korolev, I. A.** (2025). Influence of sucrose substitutes on the quality indicators of ice cream in the process of production and storage. *Food Systems*, 8(3), 370–377. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-3-370-377

by 11 hours in comparison with the control sample. On the whole, the studies have shown that full replacement of sucrose with ingredients having different molecular weight, in particular erythritol and inulin, leads to a noticeable change in the consumer and technological properties of the product.

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

## 1. Введение

За последние пятьдесят лет общемировой уровень потребления сахара возрос более чем в 3 раза, а избыток добавленного сахара в настоящее время составляет более 500 калорий в день. Высокое содержание добавленных сахаров в рационе питания приводит к развитию неинфекционных заболеваний, таких как ожирение, сахарный диабет, гипертония, сердечно-сосудистые заболевания и кариес [1]. Всемирная организация здравоохранения (ВОЗ) рекомендует снизить среднее потребление добавленных сахаров до уровня, не превышающего 10% от общей калорийности дневного рациона, и в дальнейшем до 5%, что обеспечит дополнительные преимущества для здоровья [2–4].

Сахара, вносимые дополнительно в состав таких продуктов, как мороженое, молочные десерты, выпечка, сладкие булочки, фруктовые напитки и др., относятся к добавленным сахарам, в отличие от натуральных сахаров, содержащихся в овощах и фруктах. Сахара играют важную роль в технологии продуктов питания: влияют на вкус, аромат, вязкость, стабильность продукта, снижают температуру замерзания, оказывают консервирующее действие, а также участвуют в реакции Майяра [5,6].

Мороженое и замороженные десерты — сладкий взбитый замороженный продукт. На долю сахарозы приходится не менее 35% от общего содержания сухих веществ в классическом мороженом и более 50% в десертах без добавления молока. В мороженом и замороженных десертах с использованием сухого молока обязательно присутствует молочный сахар — лактоза, избыток которой в процессе хранения мороженого приводит к ее нежелательной кристаллизации [7].

Согласно современным трендам развития пищевой промышленности, перед производителями продуктов питания, содержащих сахара, стоит задача по корректировке рецептурного состава смесей за счет использования альтернативных источников сладости. Для снижения доли добавленных сахаров производители продуктов питания уменьшают их содержание, а также заменяют низкокалорийными углеводами или высокоинтенсивными подсластителями [8,9]. В 2018 году в Австралии, Мексике, Новой Зеландии и США не менее 5% продуктов содержали хотя бы один подсластитель. В Чили этот показатель достиг 55,5%: подсластители добавлялись при изменении рецептуры, чтобы избежать маркировки «высокое содержание сахара» на этикетке [4].

Популярными заменителями сахарозы в настоящее время являются искусственные (аспартам, сахарин, сукразола) и натуральные (экстракты стевии и архата) подсластители, играющие важную роль в производстве продуктов низкокалорийных и с низким содержанием сахара. Данные подсластители имеют различную термическую стабильность в зависимости от природы происхождения [10]. В Европе к применению разрешено 19 низко- и бескалорийных подсластителей. В исследовании Samaniego-Vaesken и соавторов [11] при оценке имеющихся на рынке Испании продуктов питания и напитков установлено, что большая доля используемых подсластителей обнаруживается в диетических напитках (100%), диетических сладостях (89%), соевых напитках (45%), йогурте и ферментированном молоке (18%). Существуют исследования, которые показывают, что избыточное потребление подсластителей может негативно воздействовать на организм человека [12].

Инулин может использоваться в качестве заменителя сахарозы при создании продуктов питания. Он представляет собой полимер, который на 97% состоит из остатков фруктозы. В зависимости от длины цепи инулин может быть как олигосахаридом, так и полисахаридом [13]. Инулин является пищевым волокном, хорошо растворяется в воде, способствует росту благоприятной микрофлоры в кишечнике. Он имеет низкую калорийность (1–1,5 ккал/г), что составляет 25–35% от калорийности легко усваиваемых углеводов. Уровень сладости инулина составляется приблизительно 10% от сладости сахарозы [14]. Гликемический индекс нативного инулина имеет значение 14, а коммерческого инулина с длинной цепочкой — 5 [15].

Ahmed и соавторы [16] заменяли сахарозу в мороженом на натуральный подсластитель — стевию. Авторы отметили, что такая замена позволяет употреблять мороженое людям с сахарным диабетом. Velotto с другими исследователями [17] при изготовлении традиционного и веганского мороженого использовали семена чиа и стевию, что положительно сказалось на реологических и органолептических показателях. В исследовании [18] приводятся результаты органолептической оценки мороженого с использованием различных типов стевиолгликозидов (ребаудиозиды A, D и M) для нивелирования горького вкуса стевии. В контрольном образце содержание сахарозы составляло 14%. Ребаудиозид А обладал выраженным химическим привкусом, самый приемлемый вкус был у образцов с ребаудиозидами D и M. Кроме того, при использовании ребаудиозида профиль сладости продукта был аналогичен достигаемому в мороженом с сахарозой. Авторы работы [19] отметили наиболее удачные композиции из 12 используемых подсластителей в мороженом, оцененном 106 потребителями (60% сахарозы + 20% стевиозида + 20% эритрита и 60% сахарозы + 10% стевиозида + 30% эритрита), поскольку они обеспечивали наибольшую схожесть со сладостью сахарозы. Авторы работы [20] заменяли сахарозу в мороженом стевией и стевиозидом для снижения гликемического индекса и гликемической нагрузки.

В исследовании de Medeiros и соавторов [21] изучены шесть образцов шоколадного мороженого, различающихся по наличию лактозы и видом используемого подсластителя (сахароза, сукралоза и стевия). Оценивали интенсивность и продолжительность сладкого вкуса, сенсорное восприятие потребителями. Авторы сделали вывод, что наиболее шоколадный и сладкий вкус характерен для традиционных видов мороженого с сахарозой, образец со стевией и без лактозы получил наименьшие баллы, что, по мнению авторов, обусловлено продолжительным горьким вкусом. Образец со стевией при наличии лактозы характеризовался повышенной интенсивностью восприятия шоколадного вкуса среди потребителей. Образцы с сукралозой не имели существенных различий по сравнению с мороженым с сахарозой.

В качестве заменителя сахара Yeboah и соавторы использовали неочищенный пальмовый сахар [22]. Авторы изготовили образцы мороженого согласно рецептуре, разработанной с использованием компьютерного моделирования. По результатам дегустационной оценки отмечено, что неочищенный сахар не влияет на восприятие сладости в мороженом.

Существует решение по производству кисломолочного мороженого, где в качестве заменителя сахарозы использована изомальтулоза [23]. Авторы применяли изомальтулозу с целью снижения гликемического индекса готового продукта и сделали вывод о целесообразности использования этого углевода в производстве кисломолочного мороженого. Однако исследователи привели рецептуру, в соответствии с которой продукт содержит более 20% СОМО (в том числе лактозы не менее 10,8%) и 27% изомальтулозы. При указанном содержании сахаров молочнокислые микроорганизмы не развиваются из-за высокого осмотического давления. Кроме того, содержание дисахаридов 37,8% приведет к существенному снижению криоскопической температуры. Таким образом, вопрос применения изомальтулозы в производстве кисломолочного мороженого в эквивалентных по сладости для сахарозы количествах остается открытым.

В работе [24] проведена органолептическая оценка образцов мороженого по 22 дескрипторам, включая сладость. Оценивали три образца мороженого с заменой сахарозы и пониженным содержанием жира. В составе образца 1 использованы сорбитол, аспартам, цикламат натрия; 2 — сорбитол, сукралоза; 3 — сорбитол, лактилол, аспартам. Сравнение проводили с традиционными видами мороженого того же производителя. Традиционные виды мороженого характеризовались более сладким вкусом, что, по мнению авторов, обусловлено неэквивалентно подобранным уровнем сладости используемых подсластителей. Образцы 1 и 3 с аспартамом и цикламатом натрия имели горькое послевкусие, а образец 2 характеризовался большей интенсивностью сладкого послевкусия, что обусловлено использованием сукралозы.

Rathod в работе [25] исследовал свойства мороженого из буйволиного молока с различным соотношением аспартама (3–7 мг/кг), сорбита (7–11%) и мальтодекстрина (8–12%). Проведены анализ и прогнозирование оптимального соотношения указанных компонентов. Этому условию соответствовала композиция: 0,07% аспартама, 5,87% сорбита и 4,24% мальтодекстрина.

Таким образом, в настоящее время для снижения количества добавленной сахарозы и подслащивания продуктов питания производители все чаще используют подсластители и заменители, и их композиции в значительном (до 15%) количестве, что может вызывать формирование отличных показателей качества. Цель исследования — проведение в процессе производства и хранения сравнительной оценки показателей качества мороженого традиционного и с заменой сахарозы на композиции заменителей, снижающих гликемический индекс готового продукта: фруктозы и трегалозы; инулина с полиолами (эритритом и мальтитом); инулина с трегалозой/фруктозой.

## 2. Объекты и методы

В настоящее время существует несколько способов производства мороженого без добавленной сахарозы. В связи с этим интерес представляет исследование показателей качества мороженого с различными заменителями сахарозы по сладости и сухому веществу. Учитывая, что сахарозу можно заменять другими сахарами (фруктозой и трегалозой), полиолами (мальтитом, эритритом и др.), пищевым волокном инулином, используемыми в количестве 3–14%, в мороженом возможно формирование показателей качества, отличных от показателей продукта с сахарозой. Для сравнительной оценки показателей качества выработаны образцы мороженого с заменой сахарозы на полиолы и пищевые волокна (образцы 1 и 2); фруктозу и трегалозу (образцы 3 и 4); фруктозу и пищевое волокно (образец 5); трегалозу и пищевое волокно (образец 6) в соответствии с составом, представленным в Таблице 1. В образцах 1, 2 и 6 необходимый уровень сладости (соответствующий 14% сахарозы) достигался путем дополнительного внесения стевиозида. Образец 7к — контрольный образец традиционного сливочного мороженого с использованием сахарозы в количестве 14%.

Таблица 1. **Состав образцов**
Table 1. **Composition of the samples**

| Показатели | Образцы | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7к |
| Общее содержание сухих веществ, %, не менее, в том числе: | 34,0 | 34,0 | 34,0 | 34,0 | 34,0 | 34,0 | 34,0 |
| молочного жира | 10,0 | 10,0 | 10,0 | 10,0 | 10,0 | 10,0 | 10,0 |
| СОМО | 10,0 | 10,0 | 10,0 | 10,0 | 10,0 | 10,0 | 10,0 |
| сахарозы | – | – | – | – | – | – | 14,0 |
| эритрита | 8,0 | – | – | – | – | – | – |
| мальтита | – | 8,0 | – | – | – | – | – |
| инулина | 6,0 | 6,0 | – | – | 6,0 | 6,0 | – |
| фруктозы | – | – | 8,0 | 6,0 | 8,0 | – | – |
| трегалозы | – | – | 6,0 | 8,0 | – | 8,0 | – |
| стевиозида | 0,027 | 0,023 | – | – | – | 0,035 | – |
| стабилизатора-эмульгатора | 0,47 | 0,47 | 0,47 | 0,47 | 0,47 | 0,47 | 0,47 |

### *2.1. Объекты исследования*

В качестве объектов исследования выбраны следующие ингредиенты, заменяющие сахарозу по уровню сладости и сухому веществу: фруктоза (Galam, Израиль), трегалоза (Hayashibara Co., Япония), эритрит (ООО «Фармапол», Россия), мальтит (ООО «Питэко», Россия), инулин (Cosucra Groupe Warcoing S. A., Бельгия), стевиозид (ООО «НОВАПРОДУКТ АГ», Россия).

Для производства мороженого с массовой долей молочного жира 10% использовали следующее сырье: сухое обезжиренное молоко (ГОСТ Р 52791-2007[1], АО «Учебно-опытный молочный завод», Россия), масло сладко-сливочное несоленое Традиционное (ГОСТ 32261-2013[2], АО «Учебно-опытный молочный завод», Россия), сахар белый (ГОСТ 33222-2015[3], ТМ «Русский сахар», Россия), стабилизационная система Cremodan 334 VEG (Danisco, Дания).

### *2.2. Технологический процесс*

Производство мороженого с массовой долей жира 10% включало в себя все стадии технологического процесса: смешивание сырьевых компонентов, фильтрование смеси, пастеризация, гомогенизация, созревание, фризерование и закаливание. Температура образцов мороженого при выгрузке из фризера отличалась. Это обусловлено различиями молекулярных масс сахаров и полиолов, что сказывается на криоскопической температуре смеси.

Фризерование смеси проводили на фризере периодического действия LABO 8/12 XPL P (Carpigiani, Италия) с предварительно установленными автоматическими параметрами консистенции (до достижения уровня 80 в режиме GELATO).

Выработанные образцы мороженого были расфасованы в полимерную упаковку объемом 200 мл, хранились в одинаковых условиях при температуре минус (20 ± 2) °С. Рекомендуемый срок хранения мороженого по ГОСТ 31457-2012[4] при температуре не выше минус 18 °С — не более 6 месяцев. Исследования дисперсности структурных элементов проводили после закаливания через 3 и 6 месяцев хранения, поскольку данные периоды характеризуются наиболее возможными изменениями. Продолжительность индукционного периода образцов мороженого оценивали через 8 месяцев для понимания изменений жировой фазы в образцах мороженого с различными подсластителями после рекомендованного срока хранения.

### *2.3. Методы исследований*

Динамическую вязкость смесей определяли на вискозиметре DV–II + PRO с программным обеспечением Rheocalc V3 1–1 (Brookfield, США). Измерения проводили при поддержании температуры образца на уровне 4 ± 0,5 °С.

Твердость определяли на текстурометре LFRA Texture Analyzer с программным обеспечением TexturePro Lite v1.1 (Brookfield, США). Перед измерением показателей образцы выдерживали в морозильной камере (Vestfrost, Дания) при температуре минус (20 ± 2) °С для достижения одинаковой стабильной температуры.

Кислотность в мороженом определяли по ГОСТ 3624-92[5].

Взбитость определяли в соответствии с приложением Г к ГОСТ 31457–2012.

Криоскопическую температуру смесей мороженого $t_{кр}$, °С, определяли с использованием осмометра-криоскопа ОСКР-1 («Киви», Россия) [6].

Термоустойчивость образцов мороженого определяли по методике, описанной авторами статьи [26].

Состояние воздушной фазы и кристаллов льда и их дисперсность оценивали с использованием микроскопа СХ-41 (Olympus, Япония) и программного обеспечения ImageScope M (Россия). Для сохранения кристаллов льда использовали систему Пельтье PE120 (Linkam, Великобритания), позволяющую проводить исследования при поддержании температуры предметного стекла на уровне минус 18 °С. Размер воздушных пузырьков устанавливали методом автоматизированного подсчета, описанного в статье [27].

Измерение удельной изобарной теплоемкости ($C_p$, кДж/ (кг·°С)), температуры стеклования ($t_{ст}$, °С), энтальпии фазовых переходов ($\Delta_{iф.п.}$, кДж/кг) и доли вымороженной влаги ($\omega_з$), температуры замерзания (эвтектической) ($t_з$, °С) проводили на дифференциальном сканирующем калориметре DSC204 F1 (NETZSCH, Германия) путем последовательных экспериментов с пустыми тиглями, эталоном $Al_2O_3$ (корунд) (NETZSCH, Германия) и исследуемым образцом со скоростью нагрева измерительной ячейки β = 10 °С/мин по методике [28].

Индукционный период окисления жиров измеряли с использованием анализатора окислительной стабильности OXITEST (Velp Scientifica, Италия) с программным обеспечением OXISoft (Velp Scientifica, Италия). Масса пробы образцов мороженого составляла 30 г, рабочее давление в камере реактора — 6 бар, температура — 90 °С.

Обработку данных проводили с использованием программ Microsoft Excel, Statistica 10 и Past 4.03. Для оценки статистически значимых различий между образцами применяли однофакторный дисперсионный анализ ANOVA. Для попарного сравнения выборок применяли апостериорный критерий Тьюки. Статистически значимый результат оценивали при $P \leq 0,05$.

## 3. Результаты и обсуждение

В Таблице 2 представлены данные по пищевой ценности и гликемическому индексу выработанных образцов.

Замена сахарозы на полиолы и инулин (образцы 1 и 2) привела к снижению количества добавленных сахаров в 3,5 раза. Калорийность мороженого при замене сахарозы на композицию инулина и полиолов (образцы 1 и 2) снизилась на 30%, на инулин и фруктозу

[1] ГОСТ Р 52791-2007 «Консервы молочные. Молоко сухое. Технические условия». М.: Стандартинформ, 2008. — 15 с.
[2] ГОСТ 32261-2013. «Масло сливочное. Технические условия». М.: Стандартинформ, 2019. — 21 с.
[3] ГОСТ 33222-2015. «Сахар белый. Технические условия». М.: Стандартинформ, 2019. — 16 с.
[4] ГОСТ 31457-2012. «Мороженое молочное, сливочное и пломбир. Технические условия». М.: Стандартинформ, 2014. — 27 с.
[5] ГОСТ 3624-92. «Молоко и молочные продукты. Титриметрические методы определения кислотности». М.: Стандартинформ, 2008. — 8 с.

Таблица 2. **Пищевая ценность и гликемический индекс образцов**
Table 2. **Nutritional value and glycemic index of the samples**

| Показатели | Образцы | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7к |
| Пищевая ценность в 100 г продукта | | | | | | | |
| Белок, г, не менее | 3,4 | 3,4 | 3,4 | 3,4 | 3,4 | 3,4 | 3,4 |
| Жир, г, не менее,<br>в том числе молочного жира | 10,3<br>10,0 | 10,3<br>10,0 | 10,3<br>10,0 | 10,3<br>10,0 | 10,3<br>10,0 | 10,3<br>10,0 | 10,3<br>10,0 |
| Углеводы, г, не менее | 5,5 | 5,5 | 18,8 | 18,8 | 13,1 | 13,1 | 19,5 |
| Пищевые волокна, г, не менее | 6,0 | 6,0 | – | – | 6,0 | 6,0 | – |
| Энергетическая ценность, ккал/кДж, не менее | 128,4/532,8 | 128,6/533,6 | 181,5/758,5 | 181,5/758,5 | 158,8/662,0 | 158,8/662,0 | 184,3/770,4 |
| Гликемический индекс | | | | | | | |
| Расчетный гликемический индекс | 14 | 29 | 43 | 48 | 22 | 44 | 62 |

или трегалозу (образец 5 и 6) — на 13%. Использование 6% инулина в образцах 1, 2, 5 и 6 позволяет относить их к категории продукции с высоким содержанием пищевых волокон. Но из-за отсутствия в этих образцах 14% сахаров их нельзя относить к категории «сливочное мороженое».

Помимо калорийности, замена сахарозы в мороженом приводит к изменению расчетных значений гликемического индекса. В образцах с заменой сахарозы на полиолы и инулин (1 и 2) этот показатель снизился в 2–4,5 раза, а в образце с инулином и фруктозой (5) — в 2,8 раза.

В Таблице 3 представлены физико-химические показатели, установленные в смесях и мороженом.

Значения динамической вязкости смеси в образцах 1 и 4 были на уровне показателя смеси для контрольного образца. Наибольшей вязкостью характеризовался образец 6 с использованием инулина и трегалозы. Значение этого показателя в смеси образца 6 было на 52% больше, чем в контрольном. В образцах 5, 2 и 3 повышение вязкости по сравнению с контрольным образцом было менее выражено — на 36, 19 и 14% соответственно. Более высокая вязкость в образцах 2, 5 и 6, возможно, обусловлена присутствием инулина. Характерная для растворов инулина вязкость зависит от межмолекулярных взаимодействий, в том числе и с растворителем [13]. Можно предположить, что инулин лучше взаимодействует с моно- и дисахаридами, чем с полиолами.

Наиболее мягкая консистенция среди опытных образцов отмечена при совместном использовании фруктозы (8%) и трегалозы (6%) (образец 3), наиболее твердая — у образца с эритритом и инулином (образец 1). Достижение высокой твердости в образце с эритритом подтверждено также в исследовании Moriano в соавторстве [29]: образец с 20% сахарозы имел твердость 4 Н, а образец с 50% заменой эритритом — 16,6 Н. Авторы этой работы также отметили высокую твердость в образце мороженого с трегалозой, при 50% замене она составила 3,7 Н. Различия со значениями, полученными в нашей работе, возможно, обусловлены разным содержанием сухих веществ в продукте, объемом самих подсластителей, а также составом мороженого.

Все образцы мороженого характеризовались хорошей способностью к насыщению воздухом. Наибольшая взбитость среди исследованных рецептур смесей достигнута у образца мороженого с трегалозой и инулином (образец 6). Наиболее низкая взбитость установлена в образце с эритритом и инулином (образец 1). В исследовании Kalicka и соавторов [30] при внесении эритрита взбитость мороженого снижалась. Авторы получили данные, что в образце с содержанием сахарозы 15% взбитость была 49%, в образце с 7,5% сахарозы и 8,38% эритрита — 38%, а в образце с 7,5% сахарозы и 8,38% мальтита — 42%. В нашей работе образец мороженого с мальтитом также имел взбитость выше, чем образец с эритритом. Более высокие значения взбитости в наших образцах с полиолами, возможно, обусловлены внесением инулина в качестве восполнителя сухих веществ, а не сахарозы, как в работе [30].

Особенности замены сахарозы на указанные композиции полиолов, пищевых волокон, фруктозы и трегалозы подтвердило также исследование теплофизических свойств мороженого. Установлено, что применение эритрита способствует существенному снижению температур стеклования и замерзания смесей для мороженого (Таблица 4), что отражается в виде соответствующего смещения в область более низких температур кривой теплоемкости образца 1 (Рисунок 1). Пики плавления влаги в исследованных образцах не показаны на Рисунке 1, поскольку данные теплоемкости образцов в зоне фазового перехода не имеют практической ценности для выполнения расчетов, а вместо них при расчете тепловых процессов используются данные по энтальпии фазовых переходов ($\Delta_{ф.п.}$, кДж/кг) и зависимости количества вымороженной влаги от температуры образца. При этом наиболее близкие теплофизические свойства к показателям контрольного образца мороженого с сахарозой (7к) демонстрировали образцы с полной

Таблица 3. **Физико-химические показатели смеси и мороженого**
Table 3. **Physico-chemical indicators of the mixture and ice cream**

| Показатели | Образцы | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7к |
| Динамическая вязкость смеси при градиенте сдвига 0,67 $с^{-1}$, мПа·с | 509 ± 9,1[a] | 596 ± 5,2 | 571 ± 7,4 | 528 ± 19,0[a] | 682 ± 36,9 | 764 ± 15,6 | 500 ± 11,3[a] |
| Условная твёрдость, Н | 29,9 ± 3,7 | 4,3 ± 1,0[ab] | 1,8 ± 0,5 | 4,6 ± 1,1[ab] | 3,6 ± 0,9[a] | 5,8 ± 1,6[b] | 2,9 ± 1,0 |
| Титруемая кислотность, °Т | 23,9 | 23,6 | 22,5 | 23 | 22,5 | 22 | 23 |
| Температура мороженого при выгрузке из фризера, °С | −8,0 | −4,6 | −5,7 | −6,0 | −6,1 | −5,5 | −4,9 |
| Доля вымороженной влаги после фризера, % | 58 | 53 | 48 | 52 | 53 | 60 | 53 |
| Взбитость, % | 46 | 51 | 50 | 53 | 53 | 61 | 52 |

*Примечание*: значения, отмеченные в одной строке одинаковой буквой, не имеют статистически значимых различий ($P > 0,05$).

Таблица 4. **Результаты исследований теплофизических свойств образцов мороженого**
Table 4. **Results of the study of thermophysical properties of the ice cream samples**

| Образец | $t_{см}$, °С | $t_з$, °С | $\Delta_{ф.п.}$, кДж/кг | $Ср_{23}$, кДж/ (кг·°С) | $t_{кр}$, °С | $\omega_з$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | −68,8 ± 0,35 | −45,3 ± 0,35 | 198 ± 12 | 3,56 ± 0,15 | −3,62 ± 0,1 | 0,89 ± 0,055 |
| 2 | −47,3 ± 0,35 | −31,8 ± 0,35 | 202 ± 12 | 3,52 ± 0,15 | −2,25 ± 0,1 | 0,91 ± 0,055 |
| 3 | −53,0 ± 0,35 | −37,0 ± 0,35 | 190 ± 11 | 3,47 ± 0,15 | −3,03 ± 0,1 | 0,86 ± 0,054 |
| 4 | −51,4 ± 0,35 | −35,1 ± 0,35 | 192 ± 11 | 3,51 ± 0,15 | −2,89 ± 0,1 | 0,86 ± 0,054 |
| 5 | −51,0 ± 0,35 | −34,8 ± 0,35 | 188 ± 11 | 3,41 ± 0,15 | −2,87 ± 0,1 | 0,85 ± 0,054 |
| 6 | −43,7 ± 0,35 | −30,3 ± 0,35 | 196 ± 12 | 3,50 ± 0,15 | −2,17 ± 0,1 | 0,88 ± 0,054 |
| 7к | −46,3 ± 0,35 | −32,8 ± 0,35 | 194 ± 11 | 3,41 ± 0,15 | −2,31 ± 0,1 | 0,87 ± 0,054 |

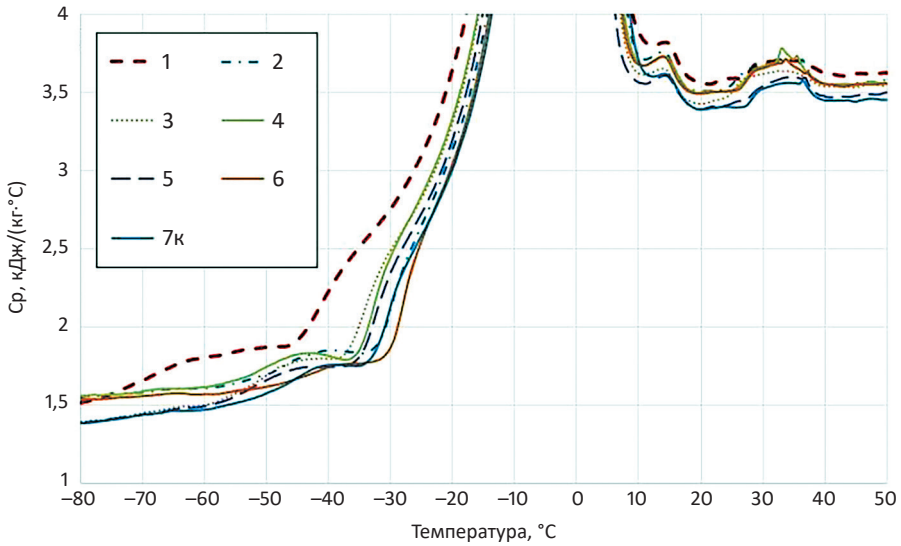



Рисунок 1. **Эффективная удельная изобарная теплоемкость образцов мороженого**
Figure 1. **Effective specific isobaric heat capacity of the ice cream samples**

заменой на мальтит и инулин, а также инулин и трегалозу (2 и 6). Отклонение температур стеклования $t_{cm}$ в этих образцах от контрольного не превышало 3 °С, отклонение температуры замерзания $t_з$ — 1,5 °С, криоскопической температуры $t_{кр}$ — 0,15 °С. Отклонение удельной изобарной теплоемкости при температуре образца 23 °С ($Cp_{23}$), энтальпии фазовых переходов влаги ($\Delta_{iф.п.}$, кДж/кг) и, соответственно, доли вымороженной влаги ($\omega_з$) составляло менее 3 %.

При производстве мороженого существенное влияние на технологические параметры процессов фризерования смесей имеет количество вымороженной влаги в образцах в зоне температур от криоскопической до минус 10 °С. Благодаря сравнительно близким температурам замерзания (эвтектики) кривые зависимости вымороженной влаги от температуры образцов 2–7к имеют коллинеарный характер (Рисунок 2), а их смещение зависит в первую очередь от молекулярной массы и криоскопической температуры низкомолекулярных компонентов смесей мороженого. Исключение составляет образец 1 с эритритом, где за счет особенностей свойств данного сахароспирта произошло снижение температуры замерзания (эвтектической) более чем на 10 °С. Благодаря этому кривая зависимости вымороженной влаги от температуры в образце 1 значительно отличается от аналогичных кривых для других образцов. Даже небольшое смещение кривых доли вымороженной влаги существенно изменяет свойства мороженого в зоне фазового перехода. Так, при температуре минус 3,62 °С в образце 1 лишь начинается формирование первых кристаллов, тогда как образцы 2, 6 и 7к при той же температуре содержат более 45 % льда.

Наименьшая криоскопическая температура установлена для образца с эритритом и инулином (образец 1). Сравнительно низкой криоскопической температурой относительно контрольного образца характеризовались образцы 3, 4 и 5 с использованием фруктозы. Различия криоскопической температуры и доли вымороженной влаги обусловлены низкой молекулярной массой указанных ингредиентов [6].

Дополнительно проведен анализ пиков плавления на ДСК-кривых смесей молочного жира, содержащихся в исследованных образцах (Рисунок 3). В отличие от значений теплоемкости, сигнал ДСК, измеряемый на ДСК калориметрах, позволяет отказаться от вертикальной привязки графиков к величине абсолютных значений сигнала и обеспечивает высокую наглядность пиков плавления жиров в каждом из исследованных образцов (двойная повторность экспериментов) за счет предоставляемой исследователям возможности их вертикального смещения (вручную).

Полученные экспериментальные данные подтверждают отсутствие статистически значимого влияния заменителей сахарозы на процесс плавления молочных жиров в исследованных образцах мороженого.

Установлено, что замена сахарозы на композиции полиолов, пищевых волокон, фруктозы и трегалозы положительно сказалась на устойчивости мороженого к таянию. В Таблице 5 приведены данные по массовой доле плава в образцах мороженого с измененным составом углеводов и с сахарозой через 60, 90 и 120 мин выдерживания при температуре 20 ± 1 °С.

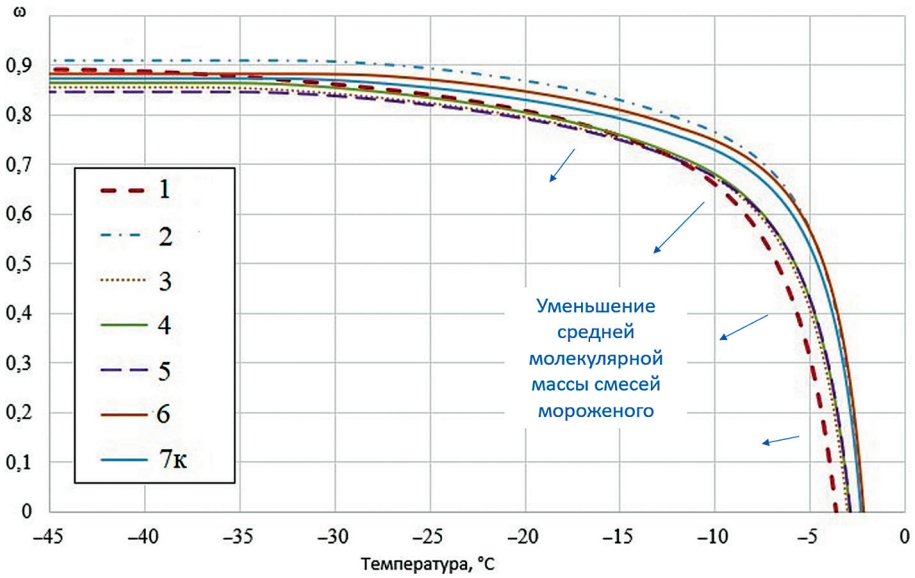



Рисунок 2. **Зависимость доли вымороженной влаги в образцах мороженого от температуры**
Figure 2. **Dependence of the proportion of frozen-out moisture in the ice cream samples on temperature**

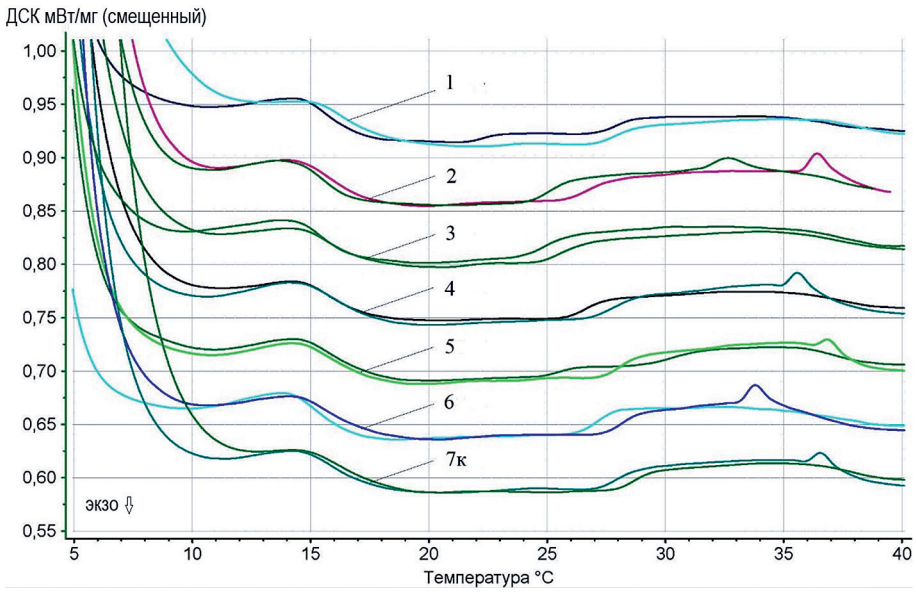



Рисунок 3. **ДСК-сигнал при плавлении молочных жиров в образцах мороженого (смещенный для наглядности)**
Figure 3. **DSC signal upon melting of milk fats in the ice cream samples (shifted for visibility)**

Таблица 5. **Массовая доля плава образцов мороженого**
Table 5. **Mass fraction of melt of the ice cream samples**

| Время выдерживания, мин | Массовая доля плава образцов мороженого, %, в образцах | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7к |
| 60 | 6,8 | 3,3 | 0,9 | 1,6 | 8,1 | 0,3 | 9,8 |
| 90 | 16,2 | 24,6 | 4,1 | 6,3 | 44,2 | 19,1 | 49,8 |
| 120 | 35,4 | 59,7 | 8,8 | 16,1 | 79,9 | 45,1 | 88,3 |

Как следует из данных Таблицы 5, все опытные образцы тают медленнее контрольного, что обусловлено наличием пищевых волокон и сахаров, прочно удерживающих воду в структуре продукта [31]. Наибольшей термоустойчивостью через 60 мин выдерживания характеризовались образцы 3 и 6, через 90 мин выдерживания — образцы 3 и 4. Наибольшей термоустойчивостью во всех контрольных точках отличался образец 3, что обусловлено синергетическими свойствами фруктозы и трегалозы.

Исследование дисперсности кристаллов льда и воздушной фазы в образцах мороженого позволило установить динамику этих показателей в процессе хранения. Данные о дисперсности структурных элементов в мороженом представлены в Таблице 6.

Установлено, что в наибольшей степени снизилась дисперсность кристаллов льда в образцах 2 (с мальтитом и инулином) и 5 (с фруктозой и инулином): размеры кристаллов через 3 месяца хранения увеличились на 15 и 21 %, а через 6 месяцев — на 30 и 37 % соответственно. Это подтверждает, что изначально образовавшиеся мелкие кристаллы льда больше всего подвержены рекристаллизации [32].

Увеличение размеров кристаллов льда через 3 месяца хранения в остальных образцах составило от 3 до 8 %. Через 6 месяцев хранения наименьшие изменения отмечены в образце 3 (с 8 % фруктозы и 6 % трегалозы), которые составили 5 %, в образце 4 с другим соотношением этих сахаров (6 % фруктозы и 8 % трегалозы) — 9 %, что характерно также для контрольного образца 7к и образца 6 (с трегалозой и инулином). Изменения в образце 1 через 6 месяцев хранения были на уровне 22 %, основное увеличение кристаллов льда пришлось на период с 3 до 6 месяцев.

Наименьшие изменения дисперсности воздушной фазы через 6 месяцев хранения отмечены в образце 2: средний размер воздушных пузырьков увеличился менее чем на 3 %, что соизмеримо с пределом допустимой погрешности 5 %. Укрупнение воздушных пузырьков в образцах 4 и 6 составило 9 и 10 %, в образцах 5 и 7к — 15 и 16 % соответственно. В образцах 1 и 3 произошли нетипичные изменения дисперсности воздушной фазы: диаметр воздушных пузырьков за период между 3 и 6 месяцами хранения снизился на 13 и 15 % соответственно, что, вероятно, обусловлено различиями образцов по консистенции. Образец 1 был тверже контрольного в 10 раз, а образец 3 мягче в 1,6 раза.

Таблица 6. **Дисперсность структурных элементов в мороженом**
Table 6. **Dispersion of the structural elements in ice cream**

| Образец | Кристаллы льда | | Пузырьки воздуха | |
|---|---|---|---|---|
| | Средний размер, мкм | Доля до 50 мкм, % | Средний размер, мкм | Доля до 50 мкм, % |
| Закаливание | | | | |
| 1 | 33,5 ± 0,2 | 92 | 34,3 ± 1,4 | 83 |
| 2 | 32,7 ± 1,3 | 94 | 42,4 ± 0,9 | 65 |
| 3 | 39,6 ± 0,4 | 82 | 41,0 ± 4,2 | 67 |
| 4 | 34,8 ± 1,6 | 91 | 36,5 ± 3,2 | 80 |
| 5 | 28,5 ± 0,5 | 98 | 38,5 ± 2,2 | 75 |
| 6 | 38,4 ± 1,5 | 86 | 45,0 ± 0,3 | 61 |
| 7к | 37,8 ± 1,0 | 84 | 35,9 ± 3,9 | 77 |
| 3 мес. хранения | | | | |
| 1 | 36,2 ± 0,3 | 90 | 35,1 ± 1,0 | 83 |
| 2 | 37,7 ± 0,1 | 85 | 43,1 ± 2,0 | 66 |
| 3 | 41,1 ± 1,4 | 81 | 42,9 ± 2,4 | 66 |
| 4 | 35,8 ± 2,3 | 91 | 38,0 ± 2,2 | 76 |
| 5 | 34,7 ± 0,4 | 91 | 39,7 ± 1,9 | 72 |
| 6 | 41,6 ± 0,5 | 79 | 46,4 ± 2,2 | 62 |
| 7к | 38,6 ± 0,1 | 85 | 38,1 ± 0,5 | 74 |
| 6 мес. хранения | | | | |
| 1 | 40,8 ± 1,3 | 83 | 30,5 ± 1,5 | 88 |
| 2 | 42,4 ± 0,1 | 76 | 43,5 ± 2,5 | 67 |
| 3 | 41,4 ± 0,2 | 81 | 36,5 ± 0,7 | 75 |
| 4 | 38,0 ± 0,9 | 88 | 39,7 ± 4,1 | 72 |
| 5 | 39,1 ± 0,3 | 83 | 44,1 ± 3,6 | 64 |
| 6 | 41,7 ± 1,0 | 80 | 49,5 ± 1,5 | 55 |
| 7к | 41,3 ± 1,5 | 81 | 41,6 ± 1,1 | 68 |

Учитывая, что окисление жировой фазы является одним из основных видов порчи мороженого, во всех образцах определена продолжительность индукционного периода окисления жира через 8 мес. хранения (Рисунок 4).

Образцы в порядке увеличения показателя «индукционный период окисления» можно расположить в последовательности: 1, 6, 4, 7к, 2, 3 и 5. Внесение композиции фруктозы и инулина (образец 5) увеличивает продолжительность индукционного периода на 11 ч по сравнению с контролем; снижение индукционного периода на 6 ч по сравнению с образцом 7к отмечено у образца 1. Индукционный период образцов 3 и 4 с одинаковым качественным, но различным количественным составом различается на 7 ч, на что следует обратить внимание при дальнейших исследованиях.

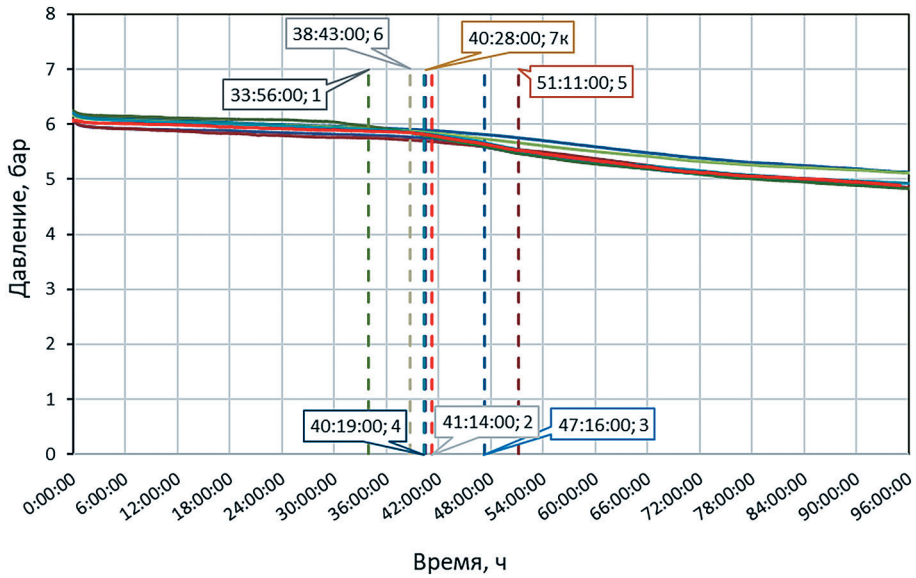



Рисунок 4. **Способность к окислению образцов мороженого с сахарами и подсластителями**
Figure 4. **Oxidability of the ice cream samples with sugars and sweeteners**

## 4. Выводы

Установлено, что в наибольшей степени в мороженом сохраняются показатели качества при замене сахарозы на композицию ингредиента с одинаковой молекулярной массой (мальтита) и инулина или на сахара (композиция фруктозы и трегалозы). Различия показателей качества мороженого с сахарозой и образцов с фруктозой и трегалозой незначительны. При этом использование фруктозы (8 %) и трегалозы (6 %) позволяет достичь более мягкой консистенции мороженого, что способствует формированию новых потребительских свойств готового продукта.

Совместное использование фруктозы и трегалозы в количествах, при которых преобладает один из сахаров, оказывает влияние на показатели консистенции и структуры мороженого. При преобладании фруктозы были обнаружены меньшие значения показателей: «условная твердость» — в 2,5 раза, а «средний диаметр кристаллов льда» — на 8–12 % (в зависимости от срока хранения) по сравнению с образцом, где преобладала трегалоза. При использовании только одного из этих сахаров в композиции с инулином было установлено, что образец 6 с трегалозой в 1,6 раза тверже, чем образец 5 с фруктозой и инулином. После закаливания наименьшие диаметр воздушных пузырьков и размер кристаллов льда образовались в образце с фруктозой, однако через 6 месяцев хранения различия размеров кристаллов льда составили 6 %, для воздушных пузырьков — 12 %.

Отмечено наибольшее снижение дисперсности кристаллов льда в образце 5 (с фруктозой) в период между закаливанием и 3 месяцами хранения. Средний размер кристаллов льда увеличился на 21 %, в образце с трегалозой — на 8 %.

Использование полиола эритрита (компонента с низкой молекулярной массой) для замены сахарозы в мороженом приводит к снижению окислительной стабильности жировой фазы, к заметному изменению показателей консистенции (увеличивается показатель «условная твердость») и теплофизических свойств, в частности, снижаются температуры стеклования (на 22 °С), замораживания (на 12,5 °С) и криоскопическая температура (на 1,3 °С).

Экспериментально подтверждено, что замена сахарозы на композиции полиолов, пищевых волокон, фруктозы и трегалозы не влияет на теплоемкость смесей в положительной области температур, и различия в теплоемкости не превышают 3 %, но существенно влияют на долю вымороженной влаги в области температур, характерной для процессов фризерования мороженого и его потребления.

Полученные результаты исследований будут полезны изготовителям мороженого с заменой сахарозы на заменители и подсластители при разработке композиционного состава, а также при выборе параметров процесса фризерования и установлении срока годности готового продукта.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / REFERENCES


1. Arshad, S., Rehman, T., Saif, S., Rajoka, M. S. R., Ranjha, M. M. A. N., Hassoun, A. et al. (2022). Replacement of refined sugar by natural sweeteners: Focus on potential health benefits. *Heliyon*, 8(9), Article e10711. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e10711
2. Bayram, H. M., Ozturkcan, A. (2022). Added sugars and non-nutritive sweeteners in the food supply: Are they a threat for consumers? *Clinical Nutrition ESPEN*, 49, 442–448. https://doi.org/10.1016/j.clnesp.2022.03.006
3. Takehara, C. T., Nicoluci, Í.G., Andrade, T.F.S., Arisseto-Bragotto, A.P. (2022). A comprehensive database of declared high-intensity sweeteners in Brazilian commercial products and updated exposure assessment. *Food Research International,* 161, Article 111899. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.111899
4. Deliza, R., Lima, M.F., Ares, G. (2021). Rethinking sugar reduction in processed foods. *Current Opinion in Food Science*, 40, 58–66. https://doi.org/10.1016/j.cofs.2021.01.010
5. Sayas-Barberá, E., Paredes, C., Salgado-Ramos, M., Pallarés, N., Ferrer, E., de Vera, C.N.-R. 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
6. Королев, И. А., Творогова, А. А., Ситникова, П. Б. (2021). Совершенствование расчетного метода определения криоскопической температуры смесей для мороженого функциональной направленности. *Пищевые системы*, 4(3), 164–171. [Korolev, I. A., Tvorogova, A.A., Sitnikova, P.B. (2021). Improvement of the computational method for determining the cryoscopic temperature of functional ice cream mixtures. *Food Systems*, 4(3), 164–171. (In Russian)] https://doi.org/10.21323/2618-9771-2021-4-3-164-171
7. Hartel, R.W., Rankin, S.A., Bradley, Jr. R.L. (2017). A 100-Year Review: Milestones in the development of frozen desserts. *Journal of Dairy Science*, 100(12), 10014–10025. https://doi.org/10.3168/jds.2017–13278
8. van der Sman, R.G.M., Jurgens, A., Smith, A., Renzetti, S. (2022). Universal strategy for sugar replacement in foods? *Food Hydrocolloids*. 133, Article 107966. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2022.107966
9. Tang, C.S., Mars, M., James, J., Appleton, K.M. (2023). Associations between attitudes towards and reported intakes of sugars, low/no-calorie sweeteners, and sweet-tasting foods in a UK sample. *Appetite*, 194, Article 107169. https://doi.org/10.1016/j.appet.2023.107169
10. da Silva Santana, N., Mothé, C.G., de Souza, M.N., Mothé, M.G. (2022). Thermal and rheological study of artificial and natural powder tabletop sweeteners. *Food Research International,* 162(Part A), Article 112039. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.112039
11. Samaniego-Vaesken, M.D.L., Ruiz, E., Partearroyo, T., Aranceta-Bartrina, J., Gil, Á., González-Gross, M. et al. (2018). Added sugars and low- and no-calorie sweeteners in a representative sample of food products consumed by the Spanish ANIBES study population. *Nutrients,* 10(9), Article 1265. https://doi.org/10.3390/nu10091265
12. Schiano, C., Grimaldi, V., Scognamiglio, M., Costa, D., Soricelli, A., Nicoletti, G.F. et al. (2021). Soft drinks and sweeteners intake: Possible contribution to the development of metabolic syndrome and cardiovascular diseases. Beneficial or detrimental action of alternative sweeteners? *Food Research International,* 142, Article 110220. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2021.110220
13. Kheto A., Bist, Y., Awana, A., Kaur, S., Kumar, Y., Sehrawat, R. (2023). Utilization of inulin as a functional ingredient in food: Processing, physicochemical characteristics, food applications, and future research directions. *Food Chemistry Advances*, 3, Article 100443. https://doi.org/10.1016/j.focha.2023.100443
14. Сербаева, Э.Р., Якупова, А.Б., Магасумова, Ю.Р., Фархутдинова, К.А., Ахметова, Г.Р., Кулуев, Б.Р. (2020). Инулин: природные источники, особенности метаболизма в растениях и практическое применение. *Биомика*, 12(1). 57–79.

[Serbaeva, E.R., Yakupova, A.B., Magasumova, Yu.R., Farkhutdinova, K.A., Akhmetova, G.R., Kuluev, B.R. (2020). Inulin: Natural sources, features of metabolism in plants and practical application. *Biomics*, 12(1), 57–79. (In Russian)]. https://doi.org/10.31301/2221-6197.bmcs.2020-5
15. Dangre, P.V., Kotkar, K.S., Pimple, A.D., Meshram, S.S. (2024). Chemistry, isolation, and pharmaceutical applications of inulin. *Current Drug Therapy*, 20(1), 8–17. https://doi.org/10.2174/0115748855274579240103042126
16. Ahmed, K.S., Hasan, G.M.M.A., Satter, M.A., Sikdar, K. (2023). Making ice cream with natural sweetener stevia: Formulation and characteristics. *Applied Food Research*, 3(2), Article 100309. https://doi.org/10.1016/j.afres.2023.100309
17. Velotto, S., Parafati, L., Ariano, A., Palmeri, R., Pesce, F., Planeta, D. et al. (2021). Use of stevia and chia seeds for the formulation of traditional and vegan artisanal ice cream. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 26, Article 100441. https://doi.org/10.1016/j.ijgfs.2021.100441
18. Muenprasitivej, N., Tao, R., Nardone, S.J., Cho, S. (2022). The effect of steviol glycosides on sensory properties and acceptability of ice cream. *Foods,* 11, Article 1745. https://doi.org/10.3390/foods11121745
19. Long, M., Wei, Y., Tao, S., Wu, Y., Wang, J., Zhou, D. et al. (2023). Ice cream with sucralose, stevioside, and erythritol as sugar substitutes: Sensory profile and customer preference. *Food Science and Technology International,* 30 (3), 273–281. https://doi.org/10.1177/10820132221150534
20. Фатихова, Т.Е., Могильный, М.П., Шленская, Т.В. (2015). Разработка новых видов мороженого с использованием натуральных сахарозаменителей. *Известия высших учебных заведений. Пищевая технология*, 4(346), 76–78. [Fatikhova, T.E., Mogilny, M.P., Shlenskaya, T.V. (2015). Development of new types of ice cream with natural sugar substitutes. *Izvestiya Vuzov. Food Technology*, 4(346), 76–78. (In Russian)]
21. de Medeiros, A.C., Tavares Filho, E.R., Bolini, H.M. (2020). Temporal profile of low calorie lactose-free ice cream chocolate flavor: Temporal dominance sensation and multiple time–intensity analysis. *Journal of Food Science and Technology,* 58, 3164–3173. https://doi.org/10.1007/s13197-020-04819-2
22. Yeboah, J., Santoro, A.M., Arrieta-Escobar, J.A., Caballero, I.M., Orjuela, A., Novoa, C.F. et al. (2022). Heuristic-based computer-aided design of ice creams and validation by using jaggery as refined sugar substitute. *Chemical Engineering Research and Design*, 184, 256–266. https://doi.org/10.1016/j.cherd.2022.06.018
23. Богданова, Е. В., Пономарёв, А. Н., Мельникова, Е. И., Самойленко, А. В. (2017). Применение изомальтулозы в технологии кисломолочного мороженого. *Вестник MAX*, 4, 24–29. [Bogdanova, E. V., Ponomarev, A. N., Melnikova, E. I., Samoilenko, A. V. (2017). Isomaltulose in the technology of ice cream form fermented milk. *Journal of International Academy of Refrigeration*, 4, 24–29 (In Russian)] https://doi.org/10.21047/1606-4313-2017-16-4-24-29
24. Cadena, R.S., Cruz, A.G., Faria, J.A.F., Bolini, H.M.A. (2012). Reduced fat and sugar vanilla ice creams: Sensory profiling and external preference mapping. *Journal of Dairy Science*, 95(9), 4842–4850. https://doi.org/10.3168/jds.2012-5526
25. Rathod, K.R., Londhe, G.K., Naik, A.P. (2013). Optimization of levels of artificial sweetener for preparation of sugar free ice-cream. *Asian Journal of Dairy and Food Research*, 32(4), 266–274.
26. Ландиховская, А. В., Творогова, А. А. (2023). Показатели качества молочного мороженого с цитрусовыми волокнами и камедями. *Пищевые системы*, 6(2), 261–268. [Landikhovskaya, A. V., Tvorogova, A. A. (2023). Quality characteristics of milk ice cream with citrus fibers and gum. *Food Systems*, 6(2), 261–268. (In Russian)] https://doi.org/10.21323/2618-9771-2023-6-2-261-268
27. Королев, И. А. (2023). Автоматизированное определение дисперсности воздушной фазы в мороженом с применением методов машинного обучения. *Техника и технология пищевых производств*, 53(3), 455–464. [Korolev, I. A. (2023). Automated measurement of air bubbles dispersion in ice cream using machine learning methods. *Food Processing: Techniques and Technology*, 53(3), 455–464. (In Russian)] https://doi.org/10.21603/2074-9414-2023-3-2448
28. Belozerov, A. G., Berezovsky, Y. M., Zherdev, A. A., Korolev, I. A., Pushkarev, A. V., Agafonkina, I. V. et al. (2018). A Study of the thermophysical properties of human prostate tumor tissues in the temperature range from-160 to +40,°C. *Biophysics,* 63, 268–273. https://doi.org/10.1134/S0006350918020057
29. Moriano, M. E., Alamprese, C. (2017). Honey, trehalose and erythritol as sucrose-alternative sweeteners for artisanal ice cream. A pilot study. *LWT*, 75, 329–334. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2016.08.057
30. Kalicka, D., Znamirowska, A., Pawlos, M., Buniowska, M., Szajnar, K. (2019). Physical and sensory characteristics and probiotic survival in ice cream sweetened with various polyols. *International Journal of Dairy Technology*, 72(3), 456–465. https://doi.org/10.1111/1471-0307.12605
31. Tolve R., Zanoni M., Ferrentino G., Gonzalez-Ortega R., Sportiello L., Scampicchio M. et al. (2024). Dietary fibers effects on physical, thermal, and sensory properties of low-fat ice cream. *LWT*, 199, Article 116094. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2024.116094.
32. Cook, K.L.K., Hartel, R.W. (2010). Mechanisms of Ice Crystallization in Ice Cream Production. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 9(2), 213–222. https://doi.org/10.1111/j.1541-4337.2009.00101.x


| СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ | AUTHOR INFORMATION |
|---|---|
| **Принадлежность к организации** | **Affiliation** |
| **Ландиховская Анна Валентиновна** — кандидат технических наук, научный сотрудник, лаборатория технологии мороженого, Всероссийский научно-исследовательский институт холодильной промышленности<br>127422, Москва, ул. Костякова, 12<br>E-mail: a.landihovskaya@fncps.ru<br>ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5881-2309<br>* автор для контактов | **Anna V. Landikhovskaya**, Candidate of technical sciences, Senior Researcher, Ice Cream Technology Laboratory, All-Russian Scientific Research Institute of Refrigeration Industry<br>12, Kostykov str., Moscow, 127422, Russia<br>E-mail: a.landihovskaya@fncps.ru<br>ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5881-2309<br>* corresponding author |
| **Творогова Антонина Анатольевна** — доктор технических наук, доцент, заместитель директора, Всероссийский научно-исследовательский институт холодильной промышленности<br>127422, Москва, ул. Костякова,12<br>E-mail: a.tvorogova@fncps.ru<br>ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7293-9162 | **Antonina A. Tvorogova**, Doctor of Technical Sciences, Docent, Deputy Director, All-Russian Scientific Research Institute of Refrigeration Industry<br>12, Kostykov str., Moscow, 127422, Russia<br>E-mail: a.tvorogova@fncps.ru<br>ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7293-9162 |
| **Королев Игорь Антонович** — кандидат технических наук, научный сотрудник, лаборатория систем хладоснабжения и теплофизических измерений, Всероссийский научно-исследовательский институт холодильной промышленности<br>127422, Москва, ул. Костякова,12<br>E-mail: i.korolev@fncps.ru<br>ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3166-2827 | **Igor A. Korolev**, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Laboratory of Refrigeration Systems and Thermophysical Measurements, All-Russian Scientific Research Institute of Refrigeration Industry<br>12, Kostykov str., Moscow, 127422, Russia.<br>Tel.: +7–495–610–83–85<br>E-mail: i.korolev@fncps.ru<br>ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3166-2827 |
| **Критерии авторства** | **Contribution** |
| **Ландиховская А. В.** — обзор литературы, проведение и обработка результатов экспериментальных исследований;<br>**Творогова А. А.** — научное руководство исследованиями, анализ и обобщение результатов исследований;<br>**Королев И. А.** — проведение и обработка результатов экспериментальных исследований. | **Landikhovskaya A. V.** — Literature review, conducting and processing the results of experimental studies;<br>**Tvorogova A. A.** — scientific advisor of research, analysis and synthesis of research results;<br>**Korolev I. A.** — conducting and processing the results of experimental studies. |
| **Конфликт интересов** | **Conflict of interest** |
| Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. | The authors declare no conflict of interest. |

DOI: https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-3-378-385

Received 09.01.2025
Accepted in revised 25.08.2025
Accepted for publication 29.08.2025
© Sharova N. Yu., Prichepa A. O., Astafyeva O. V., Kirillova N. V., 2025
Available online at https://www.fsjour.com/jour
Original scientific article
Open access

# BIOSYNTHESIS OF PIGMENT BY STRAIN *ARTHROBACTER AGILIS* WB28 DURING FERMENTATION OF SECONDARY RAW MATERIALS

Natalya Yu. Sharova[1,*], Artem O. Prichepa[1], Oxana V. Astafyeva[1], Nadezhda V. Kirillova[2]

[1] All-Russia Research Institute for Food Additives, Saint Petersburg, Russia
[2] Saint Petersburg State Chemical and Pharmaceutical University of the Ministry of Healthcare of the Russian Federation, Saint Petersburg, Russia

*KEY WORDS:*
*Arthrobacter agilis, bacterioruberin, pigments, carotenoids, secondary agricultural raw materials, hydrolases*

ABSTRACT

The article presents the results of studies aimed at developing a cost-effective technology for producing microbial carotenoids using secondary raw materials from the agro-industrial sector. The article provides data on the fermentation of media made from wheat bran, soybean meal, rapeseed cake, and the biosynthesis of bacterioruberin, a rare microbial carotenoid. The article uses the *Arthrobacter agilis* wb28 strain, isolated from wheat bran, as the producer. Cultivation was carried out on solid and liquid media; in rocking flasks and a bioreactor. The pigment was isolated from the biomass using a well-known extraction method, modified to suit the specific characteristics of the producer. When cultured on medium with agar, visible growth of colonies was observed after 48 hours. In liquid media, the stationary growth phase was reached within 16–24 hours. Active aeration during fermentation in a bioreactor increased the pigment yield compared to the process in rocking flasks. Active aeration during fermentation in a bioreactor increased the pigment yield compared to the process in rocking flasks. The dependence of pigment synthesis on the composition of the nutrient medium and the aeration regime was revealed. It was shown that *A. agilis* wb28 selectively consumes substrates. It has the ability to hydrolyze poly- and oligosaccharides, lipids, and fatty acid esters, as well as complex proteins. It can use citrate as the only source of carbon and energy. Glucose is poorly assimilated by the strain's enzyme system. The main stress factor in the composition of nutrient media from secondary raw materials for pigment formation was the concentration of carbohydrate. Protein components were mainly used for biomass production. The highest pigment yield was observed during fermentation of media from wheat bran (4.28 mg/g), while the lowest yield was observed from rapeseed cake (1.16 mg/l). The resulting bacterioruberin yield was comparable to the yield of carotenoids for known *Arthrobacter* strains.

FUNDING: The article was published as part of the research topic No. FGUS-2022-0003 of the state assignment of the V. M. Gorbatov Federal Research Center for Food Systems of RAS.

**Поступила 09.01.2024**
**Поступила после рецензирования 25.08.2025**
**Принята в печать 29.08. 2025**
© Шарова Н. Ю., Причепа А. О., Астафьева О. В., Кириллова Н. В., 2025
**https://www.fsjour.com/jour**
**Научная статья**
**Open access**

# БИОСИНТЕЗ ПИГМЕНТА ШТАММОМ *ARTHROBACTER AGILIS* WB28 ПРИ ФЕРМЕНТАЦИИ ВТОРИЧНОГО СЫРЬЯ

Шарова Н. Ю.[1,*], Причепа А. О.[1], Астафьева О. В.[1], Кириллова Н. В.[2]

[1] Всероссийский научно-исследовательский институт пищевых добавок, Санкт-Петербург, Россия
[2] Санкт-Петербургский государственный химико-фармацевтический университет Министерства здравоохранения Российской Федерации, Санкт-Петербург, Россия

*КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:*
*Arthrobacter agilis, бактериоруберин, пигменты, каротиноиды, вторичное сельскохозяйственное сырье, гидролазы*

АННОТАЦИЯ

В статье представлены результаты исследований, направленных на разработку экономически выгодной технологии получения каротиноидов микробного происхождения с использованием вторичного сырья агропромышленного производства. Приведены данные по ферментации сред из пшеничных отрубей, соевого шрота, рапсового жмыха и биосинтезу бактеориоруберина — редкого каротиноида микробного происхождения. В качестве продуцента исследовали штамм *Arthrobacter agilis* wb28, выделенный из пшеничных отрубей. Культивирование проводили на плотных и в жидких средах; в качалочных колбах и биореакторе. Пигмент выделяли из биомассы известным методом экстракции в модификации с учетом особенностей продуцента. При культивировании на агаризованных средах видимый рост колоний отмечен через 48 ч. В жидких средах наступление стационарной фазы роста выявлено уже через 16–24 ч. Активная аэрация при ферментации в биореакторе способствовала увеличению выхода пигмента по сравнению с процессом в качалочных колбах. Выявлена зависимость синтеза пигмента от состава питательной среды в совокупности с режимом аэрации. Показано, что *A. agilis* wb28 избирательно потребляет субстраты. Он обладает способностью гидролизовать поли- и олигосахариды, липиды и сложные эфиры жирных кислот, а также сложные белки. Может использовать цитрат как единственный источник углерода и энергии. Глюкоза слабо ассимилируются ферментной системой штамма. Основным стрессовым фактором в составе питательных сред из вторичного сырья для образования пигмента являлась концентрация углевода. Белковые компоненты расходовались в основном на биомассу. Наибольший количественный выход пигмента наблюдался при ферментации сред из пшеничных отрубей (4,28 мг/г), а наименьший — из рапсового жмыха (1,16 мг/л). Полученный выход бактериоруберина находился на уровне, сопоставимом с уровнем выхода каротиноидов для известных штаммов *Arthrobacter*.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Статья подготовлена в рамках выполнения исследований по государственному заданию FGUS-2022-0003 в рамках государственного задания ФГБНУ «ФНЦ пищевых систем им. В. М. Горбатова» РАН.

FOR CITATION: **Sharova, N. Yu., Prichepa, A. O., Astafyeva, O. V., Kirillova, N. V.** (2025). Biosynthesis of pigment by strain *Arthrobacter agilis* wb28 during fermentation of secondary raw materials. *Food Systems,* 8(3), 378–385. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-3-378-385

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: **Шарова, Н. Ю., Причепа, А. О., Астафьева, О. В., Кириллова, Н. В.** (2025). Биосинтез пигмента штаммом *Arthrobacter agilis* wb28 при ферментации вторичного сырья. *Пищевые системы*, 8(3), 378–385. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-3-378-385

## 1. Introduction

The agro-industrial sector generates significant amounts of waste, which are products of plant raw material processing [1]. If not properly prepared for disposal, these materials can have a detrimental impact on the environment. Quite often, they are either incinerated or disposed of in landfills [2]. Their use as secondary raw materials in livestock feed production is of interest; however, there is a risk of reduced nutritional value in such products [3]. Nevertheless, the overall content of proteins, fats, carbohydrates, and minerals in secondary raw materials presents a prospect for their application as a substrate for microbial synthesis [4,5].

Pigments are among the valuable products of microbiological synthesis. They can be produced through the bioconversion of secondary raw materials [6]. These substances possess a range of beneficial properties that give them advantages over dyes produced by chemical synthesis. They exhibit biological activity, such as anticancer, antioxidant, and antibacterial effects [7,8].

A common group of natural pigments is carotenoids. Chemically, they belong to isoprenoids, which are classified according to the number of isoprene units. Currently, chemical synthesis is the predominant method for producing carotenoids, which involves the use of petroleum products as starting materials. Methods for microbial synthesis using renewable natural resources are also known [9,10].

One of the rare carotenoids that can be obtained through biosynthesis is bacterioruberin (BR). This compound imparts a color ranging from pale pink to bright red to microbial cells. BR is an important component of haloarchaeal membranes, enabling them to adapt to high salinity and oxidative stress [11,12]. The pigment is a C50-carotenoid, and its molecule contains 13 conjugated double bonds. This structure grants BR high antioxidant activity.

Red extracts derived from haloarchaeal biomass exhibit a range of beneficial properties, including antimicrobial activity, potential for tumor treatment, support for sperm viability, and antiproliferative activity against human hepatocellular carcinoma HepG2 cell lines [13,14].

The influence of various factors on biomass growth and bacterioruberin concentration in dry cell weight has already been the subject of extensive research. Most studies in this field focus on the effects of thermal stress and osmotic shock induced by high NaCl concentrations in the nutrient medium [15–17].

The carotenoid bacterioruberin (BR) has also been identified in prokaryotes belonging to the genus *Arthrobacter* [18–20]. These microorganisms are capable of surviving in extreme conditions and can tolerate low temperatures; their representatives are numerous and often occupy a dominant position in the microbiota of terrestrial and aquatic ecosystems on our planet [18]. *Arthrobacter* bacteria are Gram-positive, exhibit exponential growth as both rods and cocci during the stationary phase, can grow under aerobic and anaerobic conditions, and belong to the *Actinobacteria* phylum [19]. Various *Arthrobacter* species are involved in plant growth promotion, synthesize industrially significant enzymes, and are a source of xeroprotectants. These data indicate that *Arthrobacter* species possess genes encoding enzymes that could be useful in fields such as industry, agriculture, and biotechnology [20,21].

This bacterial carotenoid is now well-studied, and its application in the food and feed industries is highly probable [15]. The synthesis of the bacterioruberin carotenoid is characteristic of certain members of the *Arthrobacter* genus, one of which is *A. agilis*.

Furthermore, BR synthesis is essential for the survival and reproduction of *A. agilis* at low temperatures, as evidenced by the suppression of one of its biosynthesis genes [21].

However, a significant knowledge gap currently exists regarding the influence of nutrient medium composition on the pigmentation of *A. agilis* and the role played by the enzymes synthesized by the bacterium in the biosynthesis process. Although information is available on the use of *A. agilis* for BR biosynthesis using secondary raw materials from cheese production, specifically whey, there is still a need to optimize the nutrient medium composition to achieve a higher yield of the target product [17].

This research investigated the application of common plant raw material processing wastes. Wheat bran, whose production is increasing annually, was used for this purpose. Consequently, they have become a traditional substrate for microbial synthesis [22,23]. Rapeseed meal, a byproduct of rapeseed oil production (the third most common oil worldwide), was studied as a raw material. Thus, the disposal of this meal is a major concern [24]. Soybean meal, whose composition includes substrates for the biosynthesis of various metabolites, was also investigated as a nutrient medium [25].

The aim of this study was to investigate pigment biosynthesis by the strain *A. agilis* wb28, isolated from wheat bran, during the fermentation of secondary raw materials.

## 2. Objects and methods

### *2.1. Research objects*

The cold-resistant strain *Arthrobacter agilis* wb28 (RCAM 05966), isolated by researchers from the All-Russian Research Institute for Food Additives (VNIPI) from wheat bran intended for food and feed, was investigated as a producer of bacterioruberin (BR). The strain was identified using 16S rRNA gene sequencing. It exhibits active growth at +4 °C (making it a psychrotroph) and was isolated from a source uncharacteristic for cold-tolerant microorganisms. Furthermore, it is a halophile and an organotroph.

The following secondary raw materials were studied as substrate sources for pigment biosynthesis: wheat bran (Petersburg Mill Combine, Russia), soybean meal (Zolotaya Niva, Russia), and rapeseed meal (Grandpa Nikita's Recipes, Russia).

### *2.2. Preparation and composition of nutrient media*

The nutrient medium was prepared from the raw material, which was preliminarily ground using an A11 basic laboratory mill (IKA, Germany), and distilled water. Wheat bran was placed in a beaker, mixed with 600 ml of water, and incubated for two hours at a temperature of 90 ± 3 °C. After the hot water extraction, the volume was adjusted to 1 L (resulting in a hydro-module of 1:20).

For submerged cultivation in a bioreactor, the media were filtered to avoid inaccuracies in determining the solution's turbidity. Coarse filtration was performed using cotton cloth, and the residue was washed with 100 ml of distilled water. The medium was then filtered through a "blue ribbon" filter (Reacon Plus, Russia) with a pore size of 2–3 μm. The volume of the solution was adjusted to 1 L with distilled water using a measuring cylinder.

For solid nutrient media, agar-agar (AGAT-MED, Germany) was added at a concentration of 15 g/L after bringing the volume to 1 L. Filtration was not performed in this case. The media were sterilized at 115 °C for 30 minutes.

### *2.3. Cultivation*

For surface cultivation, the bacteria were streaked onto the surface of the nutrient medium and incubated for 48 hours in a thermostat at a temperature of 28 ± 1 °C.

For submerged inoculation, the strain *A. agilis* wb28 was first cultivated on slanted LB agar for 48 hours at 28 ± 1 °C in a forced convection thermostat (Daihan Labtech LIB-080M, South Korea). Submerged cell cultivation was carried out in 750 ml baffled flasks containing 60 ml of the nutrient medium. For inoculation, a suspension was prepared by washing cells from the slanted agar tubes with the nutrient medium using a microbiological loop. The culture was grown at 28 ± 1 °C in a Multitron Standard shaker-incubator (INFORS, Switzerland) at 180 rpm for 16 hours.

For the 1 L bioreactor (BIOSTAT® A, Germany), a working volume equal to 0.6 of the total volume was used. For inoculation, 60 ml of the overnight culture, prepared using the submerged cultivation method described above, was added to 540 ml of the sterile medium. During cultivation, the dissolved oxygen content was maintained at 30 ± 5 % by adjusting the supply of sterile air and varying the agitation speed.

During the stationary growth phase of *A. agilis* wb28, a sample of the culture broth was taken to determine the dry biomass weight and bacterioruberin (BR) content.

### *2.4. Growth curve description*

The standard logarithmic model was applied to describe the growth curve of *A. agilis* wb28. The specific growth rate, μ (abs.units/h), was calculated using the following equation:

$$\mu = \frac{\ln OD - \ln OD_0}{t - t_0}, \quad (1)$$

where: $OD_0$ — is the optical density (abs. units) characterizing the biomass quantity at the initial time of a specific growth period, $t_0$; $OD$ — is the optical density (abs. units) characterizing the biomass quantity at the final time of a specific growth period, $t$; $t_0$ — is the initial time of the growth period, h; $t$ — is the final time of the growth period, h.

The doubling time (generation time) was determined using the following equation:

$$\tau_{1/2} = \frac{\ln 2}{\mu} \quad (2)$$

where: $\tau_{1/2}$ — is the doubling time, h; μ — is the specific growth rate, abs. units/h; ln 2 — is the natural logarithm.

*2.5. Determination of dry cell weight*

To determine the biomass quantity after the onset of the stationary growth phase, a 50 mL aliquot of the culture broth was centrifuged for 20 minutes using a Centrifuge 5804 (Eppendorf, Germany). The supernatant was decanted, and the pellet was resuspended and washed with 30 mL of physiological saline. The resulting suspension was centrifuged again. The pellet was then dried to constant weight for 24 hours at 105 °C in a UF260 forced-air drying oven (Memmert, Germany). The biomass was weighed on a GR-200 analytical balance (AND, Japan).

*2.6. Determination of starch in the nutrient medium*

The starch content in the nutrient medium was determined using an iodometric method [26]. An iodine reagent was used, prepared by dissolving 3 g of potassium iodide (KI) and 2.54 g of crystalline iodine ($I_2$) in 100 mL of water. To 1 mL of the sample, 30 μL of the iodine reagent was added, and the optical density was measured at a wavelength of 600 nm.

A standard 0.1% solution, prepared by heating native starch for 3 hours at 90±3 °C, was used to construct the calibration curve. The curve was generated using six data points, and the starch measurement in the samples was performed in triplicate.

*2.7. Determination of simple sugars in the nutrient medium*

For sample preparation, the samples were centrifuged at a relative centrifugal force (RCF) of 15,000 *g* for 2 minutes. Analysis was performed using a Kapel'-205 capillary electrophoresis system (Lumex, Russia). The analysis conditions were as follows: capillary internal diameter — 50 μm; total capillary length — 75 cm; temperature — 20 °C; sample injection — 30 mbar for 5 s; detection wavelength — 230 nm; voltage — negative 25 kV; electrophoregram registration time — 15 minutes.

*2.8. Determination of protein in the nutrient medium*

The protein content in the nutrient medium was quantified using the standard Lowry method [27]. For this purpose, two solutions (A and B) were prepared. Solution A consisted of 2% sodium carbonate ($Na_2CO_3$) dissolved in a 0.1 M sodium hydroxide (NaOH) solution. Solution B contained 0.5% copper sulfate ($CuSO_4$) and 1% potassium sodium tartrate tetrahydrate ($C_4H_4O_6KNa \cdot 4H_2O$).

Immediately prior to analysis, reagent C was prepared by mixing 50 mL of reagent A with 1 mL of reagent B. Subsequently, 5 mL of reagent C was added to 1 mL of the nutrient medium sample, and the mixture was incubated in a dark place for 30 minutes. Then, 0.5 mL of Folin's reagent, previously diluted twofold, was added. The sample was mixed thoroughly and incubated for an additional 30 minutes in the dark.

The optical density was measured at a wavelength of 750 nm using a BioSpectrometer basic spectrophotometer (Eppendorf, Germany).

*2.9. Evaluation of enzymatic activity of A. agilis wb28*

Nutrient differential-diagnostic and selective media were used; the pH of the media was adjusted using 0.1 N NaOH or 0.1 N HCl solutions. The sterilization regime was 15 minutes at 121 °C. Bacterial cells of *A. agilis* wb28 were streaked onto the surface of agarized media in Petri dishes or stabbed into the depth of agarized media in microbiological tubes (stab inoculation) and incubated at 28±1 °C for 24–48 hours.

Activities were assessed based on changes in coloration, the formation of precipitates and lysis zones around colonies, liquefaction of the medium during strain cultivation on solid media, and by changes in color, gas production, and turbidity in liquid and semi-liquid media.

The saccharolytic activity of *A. agilis* wb28 was tested by inoculation onto semi-solid Hiss medium with the following composition (g/L): peptone — 5, agar — 3, NaCl — 3.5, carbohydrates — 3.5, $Na_2HPO_4$ — 0.2, bromothymol blue — 0.03 (using 3 mL of a 1% solution). The composition of the Hiss medium's "color series" included: sucrose, glucose, maltose, fructose, raffinose, and soluble starch [28]. The studied culture was inoculated into Hiss media and cultivated for 24 hours. The presence of saccharolytic activity was detected by changes in the pH of the medium and gas production, which could result from the action of enzymes on carbohydrates. Changes in pH were recorded using the property of bromothymol blue to change color from yellow to blue through shades of green as the pH value varied from 5.8 to 7.6; the green color corresponded to neutral values, from 6.8 to 7.2 pH units.

Amylase activity was determined using a modified starch agar medium containing (g/L): agar — 12, soluble starch (amylodextrin) — 10, meat extract — 3, distilled water — 1 L; pH = 6.8±0.2. After incubation of the bacterial cells, 10 mL of a 0.1 N iodine solution was poured onto the agar surface to cover it completely, left for 20 minutes at room temperature, and then decanted. A clear zone of hydrolysis around the microbial culture indicated the presence of amylase activity [29]. Lipolytic activity was assessed on agarized media containing olive oil and on agarized media with Tween 80 [30]:

- **Medium with olive oil and rhodamine solution** contained (g/L): agar — 15, peptone — 5, NaCl — 4, yeast extract — 3. After autoclaving, the medium was cooled to 60 °C, and then 31.25 mL/L of autoclaved olive oil and 10 mL/L of a sterile rhodamine solution (1 mg/mL) were added; pH = 7.0±0.2. After incubation, the synthesis of lipase was inferred from the formation of orange fluorescent halos around bacterial colonies, visible under UV irradiation at a wavelength of 365 nm (using a TCP-20.LC transilluminator, Vilber, France).
- **Agar with olive oil and phenol red** was prepared from (g/L): agar — 15, peptone — 5, yeast extract — 3, $CaCl_2$ — 1, with the addition of 10 mL/L of phenol red (1 mg/mL) and 10 mL/L of olive oil; pH = 7.4±0.2. After incubation of the microbial cells, a color change from orange to pink indicated the release of fatty acids due to lipolysis.
- **Medium with Tween 80** consisted of (g/L): agar — 20, peptone — 10, NaCl — 5, $CaCl_2 \cdot 2H_2O$ — 0.1, with the addition of 10 mL/L of Tween 80 (5 g/L); pH = 7.0±0.2. After incubation, the formation of a white precipitate around the bacterial colony indicated the presence of lipase activity.

Proteolytic activity was determined on milk agar and gelatin medium:

- **Milk agar** contained (g/L): skim milk powder — 50, agar — 10, peptone — 5, yeast extract — 2.5, glucose — 1; pH = 6.8±0.2. Specifically, 25 g of skim milk powder was dissolved in 250 mL of distilled water. Separately, a 2.5% agar suspension was prepared in 500 mL of distilled water. The medium components were autoclaved separately for 15 minutes at 121 °C, cooled to 50 °C, mixed, and poured into Petri dishes. Bacterial cells were distributed in a circular pattern on the medium surface, incubated, and subsequently the plates were kept in a refrigerator at +4 °C for 36 hours. Proteolytic activity was determined by the appearance of clear zones of hydrolysis around the bacterial colonies [31].
- **The gelatin medium** consisted of (g/L): gelatin — 120, peptone — 5, meat extract — 3; pH = 6.8±0.2. Bacterial cells were inoculated via stab inoculation. After incubation, the tubes were placed in a refrigerator at +4 °C for 36 hours. Liquefaction of the gelatin indicated the presence of proteolytic activity [32].

Urease activity

- Urease activity was assessed on Christensen's medium, containing (g/L): urea — 20, agar — 10, glucose — 10, NaCl — 5, $KH_2PO_4$ — 2, peptone — 1, phenol red — 0.012; pH = 6.8±0.2. The initial medium is orange-colored; it turns yellow at lower pH and pink, then red, at alkaline pH due to the hydrolysis of urea, which releases ammonia and carbon dioxide [33].

Catalase activity

- Catalase activity was tested by adding 1.0 mL of 3% $H_2O_2$ directly to a suspension of bacterial cells grown on a solid Lysogeny Broth (LB) medium in Petri dishes. Positive reactions were indicated by the immediate formation of bubbles, demonstrating the presence of catalase enzyme, which hydrolyzes hydrogen peroxide [34].

Citrate permease activity

- Citrate permease activity was determined on solid Simmons' citrate agar, containing (g/L): agar — 20, NaCl — 5, $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ — 0.2, $K_2HPO_4$ — 1, $NH_4H_2PO_4$ — 1, $Na_3C_6H_5O_7 \cdot 5H_2O$ (trisodium citrate pentahydrate) — 3, bromothymol blue — 0.08 (using 40 mL of a 0.2% solution), distilled water — 1 L; pH = 7.2±0.2. The medium was dispensed into tubes (5–7 mL per tube), sterilized, and slanted after autoclaving. The composition of the medium supports abundant growth of bacteria utilizing sodium citrate as the sole carbon source; this growth is accompanied by a color change of the medium from green to blue [35].

*2.10. Pigment extraction and determination of bacterioruberin (BR) content*

For pigment extraction, a known method [36] was used as the basis with modifications. First, the collected sample was lysed using sonication for 30 minutes while maintaining a temperature not exceeding 20 °C. For this purpose, a Sonorex Digital 10p ultrasonic bath (Bandelin Electronic, Germany) was employed. The sample was then centrifuged using a Centrifuge 5804 (Eppendorf, Germany), resulting in a dense, red-colored pellet of *A. agilis* wb28 cells. The supernatant was decanted; this step was repeated if necessary, and any residual liquid above the cell pellet was removed using an automatic pipette. The biomass was not dried to avoid temperature exposure and subsequent degradation of BR.

Ten milliliters of methanol were added to the pellet. The pellet was then intensively homogenized using a Lab Dancer vortex mixer (IKA, Japan) and an automatic pipette to prevent cell aggregation from interfering with uniform extraction. In the next stage, the pigment was extracted from the cells using a Multi Bio RS-24 multi-rotator (Biosan, Latvia) set to 60 revolutions per minute for 10 minutes, with periodic checks to prevent renewed adhesion. The resulting extract was centrifuged, yielding a fully formed, discolored pellet of cellular debris at the bottom.

Subsequently, 10 mL of acetone were added to the pellet, followed by dispersion and another centrifugation step. The pigment concentration in the final extract was then determined spectrophotometrically using an Eppendorf BioSpectrometer (Germany) at a wavelength of 495 nm.

The concentration of the pigment, calculated as bacterioruberin (BR), was determined using the Beer-Lambert law with an extinction coefficient of 183,000.

*2.11. Statistical analysis*

The standard deviation method, adjusted with Student's t-test, was used to evaluate the error in determining optical density, dry biomass weight concentration, pigment, protein, and starch content, as well as in calculating the constants describing growth curves and cell doubling time. For three measurements and a confidence interval of $\alpha = 0.05$, the t-value was 4.30. For simple sugars (mono- and disaccharides), whose content was determined by capillary electrophoresis, the expanded uncertainty is indicated. Student's t-test was applied for the statistical comparison of the target product yield when using different substrates.

## 3. Results and discussion

The degree of pigmentation was initially assessed visually following surface inoculation and incubation of the cell culture. On the medium with soybean meal, the colonies of the *A. agilis* wb28 strain exhibited a bright red color, indicating a high concentration of pigment in the biomass. In contrast, on the medium with wheat bran, the bacterial cells displayed a pink hue during growth. When cultivated on the medium with rapeseed meal, the cells showed less pronounced pigmentation and a pale pink color (Figure 1).

Apparently, the synthesis of the pigment is significantly influenced by the structure of the carbohydrate, which may potentially participate in building the pigment's carbon backbone.

In a comparative analysis, the studied wheat bran exhibits a greater qualitative diversity of sugars and is superior in total carbohydrate content to both rapeseed meal and soybean meal (Table 1).

When comparing the prevalence of sugars based on the complexity of their chemical structure, the highest total sugar content is also characteristic of wheat bran. Wheat bran contains the polysaccharide starch, the trisaccharide raffinose, and the disaccharides sucrose and maltose. Although rapeseed meal contains both complex and simple sugars, maltose was not detected, and sucrose dominates. Soybean meal, among the identified carbohydrates, contains only starch.

The aforementioned hypothesis regarding the influence of the carbon source's structure on pigment synthesis by the *A. agilis* wb28 strain is, to some extent, supported by the results of studying its consumption of individual carbohydrates. It was revealed that incubation of the strain on certain carbohydrate-containing media leads to changes in the color and pH of the medium, indicating the activity of the microorganism's enzyme system and carbohydrate consumption (Table 2).

According to the obtained data, the *A. agilis* wb28 strain actively utilizes oligo- and polysaccharides, suggesting the inducible synthesis of specific hydrolases. Based on literature sources, *A. agilis* bacteria can produce hydrolases such as lipase, amylase, protease, chitinase, and β-galactosidase [37].

The studies revealed that the *A. agilis* wb28 strain possesses saccharolytic, lipolytic, and proteolytic capabilities to hydrolyze complex substrates and transform simple molecules of various chemical natures (Table 3). It should be noted that *A. agilis* wb28 consumed substrates selectively. For instance, among the numerous components of the nutrient media, glucose, gelatin, and urea were either not assimilated or were poorly assimilated by the strain's enzyme system.

Glucose, at the concentration used in the nutrient medium, apparently inhibited the growth of the studied strain and was assimilated more slowly. It is possible that the bacterium cannot efficiently utilize glucose as an energy source due to a lack or absence of enzymes for its assimilation. Another possible reason is the presence of more preferable carbon sources. This assumption is based on the fact that on a medium containing only agar (composed of the polysaccharides agarose and agaropectin) as a carbon source, the strain exhibited active growth, unlike on a medium of the same composition but with additional glucose (Table 2).

Table 2. **Saccharolytic properties of the *Arthrobacter agilis* wb28 strain**
Таблица 2. **Сахаролитические свойства штамма *Arthrobacter agilis* wb28**

| Carbohydrate | Sign | | | |
|---|---|---|---|---|
| | Change in Medium Color | Change in Medium pH | | Growth (Pellicle Formation) |
| | | Acidification | Alkalization | |
| Sucrose | ++ | ++ | – | + |
| Glucose | – | – | – | +/– |
| Maltose | ++ | – | + | + |
| Fructose | ++ | ++ | – | + |
| Raffinose | ++ | ++ | – | + |
| Mannitol | ++ | ++ | – | +/– |
| Sorbitol | + | – | ++ | +/– |
| Amyldextrin | + | – | + | + |
| Cellulose | ++ | – | + | + |
| Agarose+Agaropectin | ++ | – | ++ | ++ |

**Note:** «+» Positive reaction, «++» Strong positive reaction, «–« Negative reaction, «+/» Weak or variable reaction.

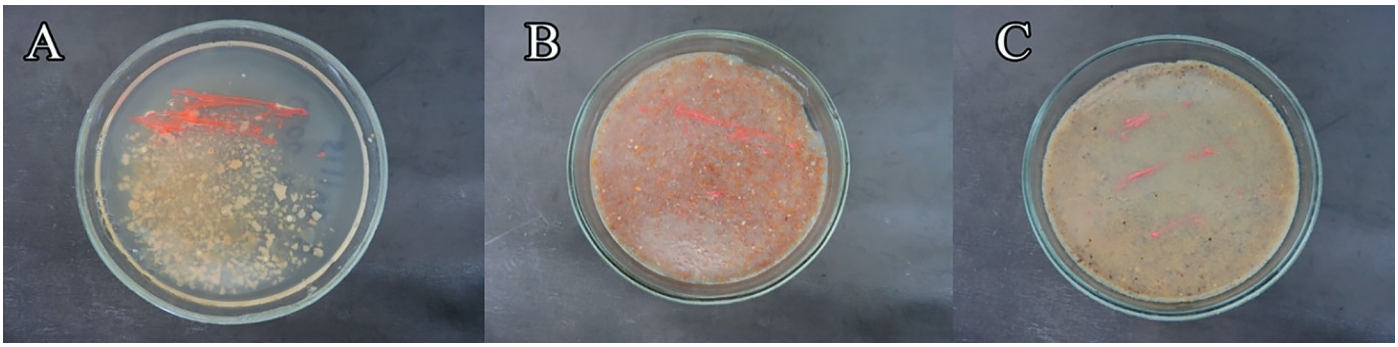



Figure 1. **Growth of *Arthrobacter agilis* wb28 cells on solid agarized medium: A — soybean meal, B — wheat bran, C — rapeseed meal**
Рисунок 1. **Рост клеток *Arthrobacter agilis* wb28 на плотной агаризованной среде: A — соевый шрот, B — пшеничные отруби, C — рапсовый жмых**

Table 1. **Carbohydrate and protein composition of the nutrient medium**
Таблица 1. **Углеводный и белковый состав питательной среды**

| Raw Material | Mass Concentration of Component, g/L | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Fructose | Glucose | Maltose | Sucrose | Raffinose | Starch | Protein |
| Soybean Meal | – | – | – | – | – | 1,86±0,09 | 5,49±0,21 |
| Wheat Bran | 0,090±0,010 | 0,170±0,010 | 0,430±0,030 | 0,800±0,060 | 0,540±0,040 | 3,25±0,13 | 3,39±0,14 |
| Rapeseed Meal | 0,040±0,003 | 0,051±0,004 | – | 3,060±0,240 | 0,77±0,06 | 0,46±0,03 | 2,18±0,08 |

**Note:** «–» — not detected.

Table 3. **Enzymatic activity of the *Arthrobacter agilis* wb28 strain**
Таблица 3. **Ферментативная активность штамма *Arthrobacter agilis* wb28**

| Enzymatic Activity | Specific Substrate (Source) | Chemical Nature of Substrate / Class of Compounds | Activity |
|---|---|---|---|
| Saccharolytic | Sucrose | Carbohydrate / Disaccharide | + |
| | Glucose | Carbohydrate / Monosaccharide | – |
| | Maltose | Carbohydrate / Disaccharide | + |
| | Fructose | Carbohydrate / Monosaccharide | + |
| | Raffinose | Carbohydrate / Trisaccharide | + |
| | Mannitol | Carbohydrate / Sugar alcohol | + |
| | Sorbitol | Carbohydrate / Sugar alcohol | + |
| | Agarose and Agaropectin (Agar) | Carbohydrate / Polysaccharide | + |
| Amylolytic | Amyldextrin (Soluble Starch) | Carbohydrate / Polysaccharide | + |
| Lipolytic | Esters of Fatty Acids and Glycerol (Olive Oil) | Lipids / Fats (Triglycerides) | + |
| | Polyoxyethylene (20) sorbitan monooleate — Ester of oleic acid, sorbitol, and its anhydrides (Tween 80) | Nonionic Surfactant | + |
| Proteolytic | Casein (Skim Milk Powder) | Protein | + |
| | Partially Hydrolyzed Collagen (Gelatin) | Polypeptides | – |
| Urease | Urea | Diamide of Carbonic Acid | – |
| Citrate Permease | Sodium Citrate | Salt of Citric Acid | + |
| Catalase | Hydrogen Peroxide | Peroxide | + |

Many members of the *Arthrobacter* genus lack proteolytic activity. However, *A. agilis* wb28 peptonized milk. This indicates the synthesis of caseinase for hydrolyzing casein, the predominant complex protein in milk.

However, *A. agilis* wb28 does not liquefy gelatin, which consists of a mixture of low-molecular-weight peptide fractions or their aggregates, the most common of which is the tripeptide ProHypGly (proline — hydroxyproline — glycine). Most *Arthrobacter* strains do not synthesize gelatinase, which hydrolyzes gelatin.

Urea (diamide of carbonic acid) is not utilized by *A. agilis* wb28 as a nitrogen source; the strain does not synthesize urease, which catalyzes the hydrolysis of urea.

As the experimental results showed, the bacterium is capable of utilizing citrate as the sole source of carbon and energy for its growth. This indicates that the strain synthesizes an enzyme-like protein, citrate permease. In this case, this protein is involved in the transport of citrate into the bacterial cell. Inside the cell, citrate is incorporated into the reaction chain to produce energy.

The *A. agilis* wb28 strain exhibits a pronounced ability to hydrolyze lipids, triglycerides, and plant-derived fatty acid esters.

The aforementioned results on the hydrolytic capacity of *A. agilis* wb28 indicate the occurrence of biochemical processes primarily characteristic of the *Arthrobacter* genus. The biosynthesis of secondary metabolites by the bacterium, particularly the pigment, is a response to stressful conditions. For arthrobacters, known stress factors that significantly influence the intensity of pigment synthesis are low environmental temperature and osmotic pressure. The experiments maintained the same temperature regime for the fermentation of the nutrient media. Regarding the osmotic factor, the studied secondary raw materials differ in chemical composition, including salt content. The content of mineral components can vary depending on the characteristics of the agricultural crop from which it was derived. For example, the main mineral elements present in feed wheat bran are, g/kg: potassium — 10.6; phosphorus — 7.4; magnesium — 4.5; calcium — 0.9, while other elements constitute only 1% [38]. Soybean meal contains, g/kg: potassium — 25.2; phosphorus — 7.7; magnesium — 4.9; calcium — 4.7; sodium — 1.1, while other elements (manganese, zinc, iron, copper) constitute 3% [39]. Rapeseed meal contains, g/kg: potassium — 11.1; phosphorus — 7.9; calcium — 4.8; sulfur — 4.5; magnesium — 4.4; iron — 0.5; the rest are less than 1% (manganese, zinc, copper, cobalt, iodine) [40]. Accordingly, the trend of potassium and phosphorus predominance in the nutrient media prepared from the studied raw materials persists. However, while the phosphorus content in the raw materials is at a similar level, potassium is 2.5 times more abundant in soybean meal. In other words, the likelihood of ion pump operation involving potassium ions is higher for bacterial cells when cultivated in a liquid medium with soybean meal. In aerobic bacterial cells, nutrient transport into the cell occurs via symport with protons involving specific carrier proteins, permeases (paired transport of two different organic molecules or ions across the membrane) [41]. The A. agilis wb28 strain is capable of synthesizing permease for the assimilation of, in particular, sodium citrate (Table 3). Theoretically, the quantitative salt composition should not sharply provoke pigmentation of the culture fluid. Depending on the cationic and anionic composition of the salts, as shown by studies of other scientists, the pigment content in the biomass of *A. agilis* can fluctuate both towards increase and decrease [42].

As a result of fermenting nutrient media from the studied raw materials in shake flasks under shaker-incubator conditions and extracting the pigment from the bacterial biomass, the following quantitative data were obtained, mg/L: soybean meal fermentation — 24.46±0.62, wheat bran — 10.19±0.46, rapeseed meal — 2.39±0.03. Apparently, during the cultivation of the *A. agilis* wb28 strain in a liquid medium with soybean meal, the predominance of potassium contributed to active nutrient transport. Combined with a relatively higher protein content, metabolic processes proceeded more intensively, stimulating the accumulation of biomass and the biosynthesis of metabolites, including the pigment.

In a comparative aspect, the obtained results somewhat diverge from the visual assessment of the degree of pigmentation of *A. agilis* wb28 colonies when cultivated on solid agarized media from the studied secondary raw materials (Figure 1). Most likely, this is due to slowed and unevenly occurring diffusion processes in the agar medium. Considering that *A. agilis* wb28 is an aerobe, the uniformity of oxygen distribution throughout the volume of the culture medium significantly affects both biomass accumulation and metabolite biosynthesis. It is known from literature sources that the induction of carotenoid biosynthesis, particularly BR, occurs as a result of exposure to such physicochemical environmental factors as the intensity of light irradiation of microbial cells, changes in medium salinity, and the level of aeration also has a significant influence [9,43]. The biosynthesis of carotenoids and their derivatives by bacteria, including BR, is associated with redox reactions [44]. In shake flasks under shaker-incubator conditions, the rate of oxygen supply to bacterial cells is not always uniform, which can significantly affect the research results. When cultivating *A. agilis* wb28 in a liquid medium in a bioreactor, a stable saturation level necessary for bacterial viability was maintained. The study of growth kinetics, traditionally characterized by the level of optical density, showed that, regardless of the substrate, the stationary growth phase occurs after 16–24 hours of cultivation (Figure 2).

The obtained data indicate rapid culture growth under laboratory bioreactor conditions simulating an industrial biotechnological process. The lag phase for all studied raw materials lasted approximately 8 hours and was less pronounced during rapeseed meal fermentation. The highest biomass accumulation was observed during soybean meal fermentation, which is consistent with the shake flask cultivation results. However, pigment productivity was higher when *A. agilis* wb28 was cultivated on wheat bran-based medium (Table 4).

Aerobes utilize oxygen for respiration, which is linked to the activity of oxidoreductases that catalyze redox reactions. During oxygen consumption for respiration, hydrogen peroxide is also produced in the cells of aerobes as a byproduct of oxidative phosphorylation. Bacteria, including *Arthrobacter*, possess various defense mechanisms against hydrogen peroxide due to its potential toxicity. These mechanisms involve the action of oxidoreductases such as catalase and peroxidase, resulting in the decomposition of hydrogen peroxide into water and oxygen.

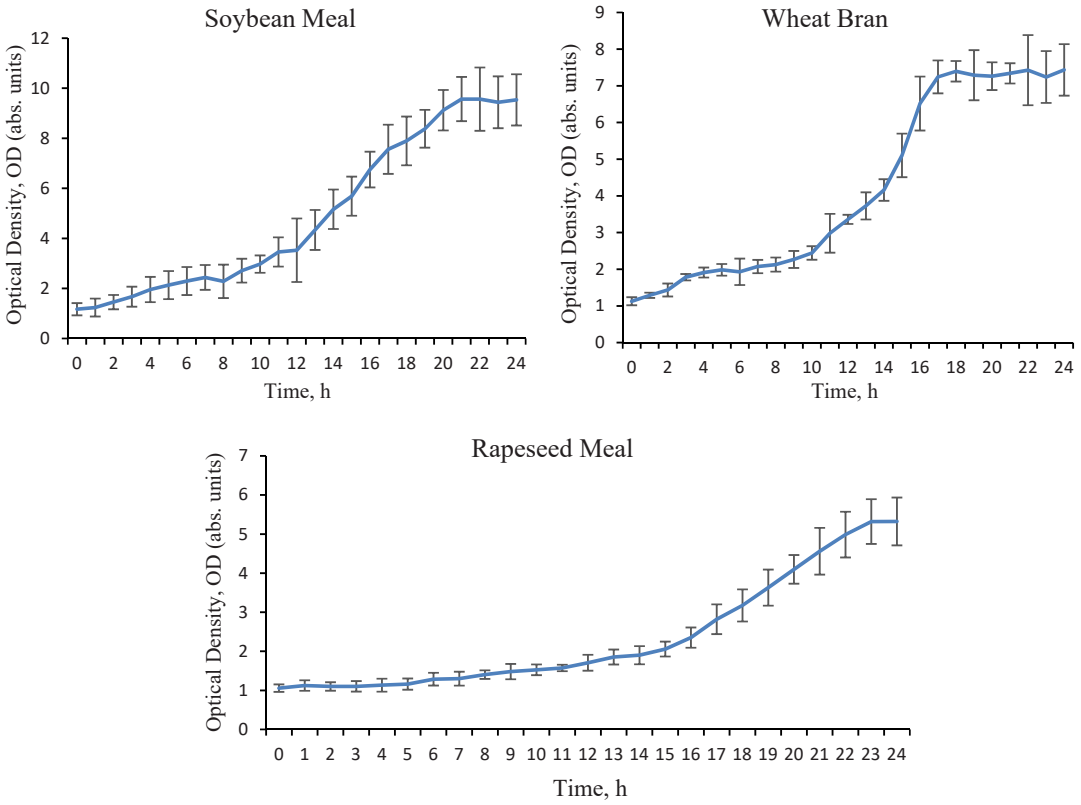



Figure 2. **Growth kinetics of *Arthrobacter agilis* wb28 cultured on media from secondary raw materials**
Рисунок 2. **Кинетика роста штамма *Arthrobacter agilis* wb28, культивированного на средах из вторичного сырья**

Table 4. **Fermentation performance indicators of secondary raw materials**
Таблица 4. **Показатели эффективности ферментации вторичного сырья**

| Indicator | Raw Material | | |
|---|---|---|---|
| | Soybean Meal | Wheat Bran | Rapeseed Meal |
| Dry cell weight concentration, g/L | 1,37±0,14[a] | 0,98±0,07[b] | 0,78±0,04[c] |
| Cell doubling time, h | 1,67 | 2,13 | 3,85 |
| Pigment (BR) concentration in culture liquid, mg/L | 2,59±0,21[a] | 4,28±0,37[b] | 1,16±0,08[c] |

a, b, c — Mean values within a column sharing common superscript letters are not significantly different ($p < 0.05$).

As indicated above, besides hydrolytic activity, the studied strain *A. agilis* wb28 exhibited catalase activity (Table 3). The oxidoreductase activity of some *Arthrobacter* bacteria increases under the influence of extreme factors [45]. It is plausible that the oxidation of carbohydrates in the culture medium under intense aeration is accompanied by excessive formation of hydrogen peroxide, which can induce oxidative stress. Consequently, *A. agilis* wb28 initiates the biosynthesis of catalase to decompose hydrogen peroxide.

Oxidative stress can negatively impact carotenoid biosynthesis, as it may alter the properties of enzymes and other components essential for this process. On the other hand, carotenoids themselves act as antioxidants and play a protective role by neutralizing reactive oxygen species (ROS), including those formed during peroxide decomposition. It is possible that under oxidative stress conditions, the bacterium *A. agilis* wb28 synthesizes an increased amount of carotenoids.

It is known that in haloarchaea, during bacterioruberin (BR) synthesis, oxidoreductases catalyze the oxidation of carotenoid precursors — isoprene units. The precursor of BR is the isoprenoid compound lycopene, which belongs to the carotenes [46]. The conversion of lycopene into BR occurs through numerous chemical processes such as elongation, hydration, dehydrogenation, and hydroxylation. As a result of these transformations, carotenoid molecules can contain epoxy, hydroxyl, and carbonyl groups, as well as carry methoxy- and carboxy-radicals. BR is an oxygen-containing carotenoid and contains 13 conjugated double bonds, which contributes to its efficient elimination of hydroxyl radicals [46].

Collectively, the biosynthesis of both catalase and BR by the strain *A. agilis* wb28 represents a comprehensive response of the bacterial antioxidant system to stress associated with carbohydrate transformation under conditions of active aeration of the culture medium.

The relatively high content of carbohydrate components in the initial nutrient media compared to mineral substances indicates that the primary stress factor in the nutrient medium composition for pigment formation by the studied strain is the carbohydrate concentration. Protein components were primarily utilized for biomass production. The significant amount of protein in the nutrient medium based on soybean meal explains the more productive accumulation of biomass during the cultivation of *A. agilis* wb28 (Table 1 and Table 4). The initial nutrient medium based on rapeseed meal was characterized by a lower protein content, which accounts for the reduced “Mass concentration of dry biomass” indicator.

The results of assessing the feasibility of using the studied secondary raw materials for the biotechnological production of BR showed that the strain *A. agilis* wb28 is capable of synthesizing carotenoids when cultivated on nutrient media from wheat bran, soybean meal, and rapeseed meal. The quantitative indicator obtained from the extraction of BR is comparable to the yield levels of pigments synthesized by representatives of the genus *Arthrobacter* during the fermentation of various types of secondary raw materials (Table 5).

Known pigment-synthesizing bacteria from other genera (such as *Bradyrhizobium* sp. *Flavobacterium* sp., *Sphingobacterium multivorum, Sphingomonas paucimobilis, Paracoccus* sp., etc.), including halophilic species (e. g., *Bacillus clausii*), are characterized by their ability to grow on various substrates and synthesize a relatively wide spectrum of carotenoids [50]. However, no producers of bacterioruberin (BR) are found among them.

Compared to representatives of halophilic archaea, the BR yield obtained during the cultivation of *A. agilis* wb28 is relatively lower. However, it is important to note that in such studies [e. g., 49], individual carbohydrate sources were used as substrates. The productivity of halophilic bacteria in terms of carotenoids is generally on par with that of filamentous fungi and yeasts, potentially constituting less than 1 % and reaching up to 4.5 % of the dry biomass [50]. When calculated per dry biomass, the BR yield for *A. agilis* wb28 was 0.2 % when cultivated on media from soybean and rapeseed meal, and 0.5 % on wheat bran.

Compared to filamentous fungi and yeasts, the advantages of using bacterial producers of carotenoids include a shorter fermentation cycle, a less robust cell wall, and consequently, greater accessibility for diffusion processes during extraction. The aforementioned factors create prerequisites for establishing a faster, simpler, and less costly carotenoid production process.

Table 5. **Comparison of the yield of target carotenoids during the cultivation of bacteria of the genus *Arthrobacter* on media derived from secondary raw materials and their processing products**

Таблица 5. **Сравнение выхода целевых каротиноидов при культивировании бактерий рода *Arthrobacter* на средах из вторичного сырья и продуктов их переработки**

| Substrate | Producer | Pigment | Yield | Source |
|---|---|---|---|---|
| Soybean meal | *A. agilis* wb28 | Bacterioruberin | 2.59 mg/L | Present study |
| Wheat bran | *A. agilis* wb28 | Bacterioruberin | 4.28 mg/L | Ibid. |
| Rapeseed meal | *A. agilis* wb28 | Bacterioruberin | 1.16 mg/L | — |
| Whey | *A. agilis* NP20 | Bacterioruberin | 5.13 mg/L | [42] |
| Molasses | *A. agilis* A17 | β-Carotene | 100 mg/g | [47] |
| Starch | *Arthrobacter* sp. QL17 | Arthroxanthin | 25 mg/g | [48] |
| Starch-containing fraction | *Haloferax mediterranei* | Bacterioruberin | 97.39 ± 1.86 μg/mL | [49] |

## 4. Conclusion

Thus, bacteria of the genus *Arthrobacter* are of interest as promising producers for the microbiological synthesis of carotenoids. The bacterial isolate *A. agilis* wb28 is capable of synthesizing the carotenoid bacterioruberin (BR) when cultivated on complex media derived from secondary raw materials. It should be noted that the studied strain synthesizes BR with a higher yield on a nutrient medium made from the raw material from which it was originally isolated, namely wheat bran.

The quantity and structure of carbohydrates in the nutrient medium significantly influence pigment synthesis by the strain *A. agilis* wb28. Wheat bran medium contains predominantly starch as well as simple sugars. These serve as a carbon source, which is necessary, in particular, for building the carbon skeleton of carotenoids. Under conditions of carbohydrate deficiency, as observed in the soybean meal medium, pigment formation in the bacterial cells is reduced. At the same time, the high protein content, compared to other media, positively affected biomass growth.

It is important to consider that pigment synthesis by the strain *A. agilis* wb28 is influenced not only by low temperature and osmotic pressure but also by the composition of the nutrient medium in combination with the aeration regime.

The presented experimental data indicate the prospective potential for using three types of secondary raw materials for the biosynthesis of BR. The obtained results contribute to expanding knowledge about the biosynthetic properties of bacterial isolates, particularly representatives of the genus *Arthrobacter*. The identified patterns will allow for the development of targeted fermentation technologies for secondary raw materials to achieve productive biosynthesis of carotenoids. These carotenoids could subsequently be recommended for study as potential feed and food micro-ingredients.

Since bacteria, besides carotenoids, also synthesize other biologically active substances (such as enzymes with various specificities) and are characterized by a short life cycle, their widespread use in industrial production is highly feasible.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / REFERENCES


1. Singh, R., Das, R., Sangwan, S., Rohatgi, B., Khanam, R., Peera, S. K. P. G. et al. (2021). Utilisation of agro-industrial waste for sustainable green production: A review. *Environmental Sustainability*, 4(4), 619–636. https://doi.org/10.1007/s42398-021-00200-x
2. Sadh, P. K., Duhan, S., Duhan, J. S. (2018). Agro-industrial wastes and their utilization using solid state fermentation: A review. *Bioresources and Bioprocessing*, 5(1), Article 1. https://doi.org/10.1186/s40643-017-0187-z
3. Malenica, D., Kass, M., Bhat, R. (2023). Sustainable management and valorization of agri-food industrial wastes and by-products as animal feed: For ruminants, non-ruminants and as poultry feed. *Sustainability*, 15(1), Article 117. https://doi.org/10.3390/su15010117
4. Astudillo, Á., Rubilar, O., Briceño, G., Diez, M. C., Schalchli, H. (2023). Advances in agroindustrial waste as a substrate for obtaining eco-friendly microbial products. *Sustainability*, 15(4), Article 3467. https://doi.org/10.3390/su15043467
5. Rodríguez-Espinosa, T., Voukkali, I., Pérez-Gimeno, A., Candel, M. B. A., Hernández-Martich, J. D., Zorpas, A. A. et al. J. (2024). Waste as a sustainable source of nutrients for plants and humans: A strategy to reduce hidden hunger. *Sustainability*, 16(16), Article 7185. https://doi.org/10.3390/su16167185
6. Lopes, F. C., Ligabue-Braun, R. (2021). Agro-industrial residues: Eco-friendly and inexpensive substrates for microbial pigments production. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 5, Article 589414. https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.589414
7. Rao, M. P. N., Xiao, M., Li, W.-J. (2017). Fungal and bacterial pigments: Secondary metabolites with wide applications. *Frontiers in Microbiology*, 8, Article 1113. https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.01113
8. Shakeri, A., Soheili, V., Karimi, M., Hosseininia, S. A., Bazzaz, B. S. F. (2018). Biological activities of three natural plant pigments and their health benefits. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 12(1), 356–361. https://doi.org/10.1007/s11694-017-9647-6
9. Martínez-Cámara, S., Ibañez, A., Rubio, S., Barreiro, C., Barredo, J.-L. (2021). Main carotenoids produced by microorganisms. *Encyclopedia*, 1(4), 1223–1245. https://doi.org/10.3390/encyclopedia1040093
10. Yaqoob, S., Riaz, M., Shabbir, A., Zia-Ul-Haq, M., Alwakeel, S. S., Bin-Jumah, M. (2021). Commercialization and Marketing Potential of Carotenoids. Chapter in a book: Carotenoids: Structure and Function in the Human Body. Springer International Publishing, 2021. https://doi.org/10.1007/978-3-030-46459-2_27
11. Hwang, C. Y., Cho, E.-S., Kim, S., Kim, K., Seo, M.-J. (2024). Optimization of bacterioruberin production from *Halorubrumruber* and assessment of its antioxidant potential. *Microbial Cell Factories*, 23, Article 2. https://doi.org/10.1186/s12934-023-02274-0
12. Salvador-Castell, M., Tourte, M., Oger, P. M. (2019). In search for the membrane regulators of archaea. *International Journal of Molecular Sciences*, 20(18), Article 4434. https://doi.org/10.3390/ijms20184434
13. Gianni, M., Monteiro-Lobato, Z., Garbayo, I., Vilchez, C., Vega, J.M., Martinez-Espinosa, R.M. (2021). Haloferax mediterranei cells as C50 carotenoid factories. *Marine Drugs*, 19(2), Article 100. https://doi.org/10.3390/md19020100
14. Giani, M., Garbayo, I., Vílchez, C., Martínez-Espinosa, R. M. (2019). Haloarchaeal carotenoids: Healthy novel compounds from extreme environments. *Marine Drugs,* 17(9), Article 524. https://doi.org/10.3390/md17090524
15. Merlino, G., Barozzi, A., Michoud, G., Ngugi, D. K., Daffonchio, D. (2018). Microbial ecology of deep-sea hypersaline anoxic basins. *FEMS Microbiology Ecology*, 94(7), Article 85. https://doi.org/10.1093/femsec/fiy085
16. Flores, N., Hoyos, S., Venegas, M., Galetović, A., Zúñiga, L.M., Fábrega, F. et al. (2020). *Haloterrigena* sp. strain SGH1, a bacterioruberin-rich, perchlorate-tolerant halophilic archaeon isolated from halite microbial communities, Atacama Desert, Chile. *Frontiers in Microbiology,* 11, Article 324. https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.00324
17. Guo, S., Song, Q., Song, X., Zhang, C., Fei, Q. (2024). Sustainable production of C50 carotenoid bacterioruberin from methane using soil-enriched microbial consortia. *Bioresource Technology*, 412, Article 131415. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2024.131415
18. Agarwal, H, Bajpai, S, Mishra, A, Kohli, I, Varma, A, Fouillaud, M. et al. (2023). Bacterial pigments and their multifaceted roles in contemporary biotechnology and pharmacological applications. *Microorganisms*, 11(3), Article 614. https://doi.org/10.3390/microorganisms11030614
19. Silva, T. R., Tavares, R. S. N., Canela-Garayoa, R., Eras, J., Rodrigues, M. V. N., Neri-Numa, I. A. et al. (2019). Chemical characterization and biotechnological applicability of pigments isolated from Antarctic bacteria. *Marine Biotechnology*, 21(3), 416–429. https://doi.org/10.1007/s10126-019-09892-z
20. Mussagy, C. U., Caicedo-Paz, A. V., Farias, F. O., de Souza Mesquita, L. M., Giuffrida, D., Dufossé, L. (2024). Microbial bacterioruberin: The new C50 carotenoid player in food industries. *Food Microbiology*, 124, Article 104623. https://doi.org/10.1016/j.fm.2024.104623
21. Flegler, A., Lipski, A. (2021). The $C_{50}$ carotenoid bacterioruberin regulates membrane fluidity in pink-pigmented *Arthrobacter* species. *Archives of Microbiology*, 204(1), Article 70. https://doi.org/10.1007/s00203-021-02719-3
22. Di Fidio, N., Carmassi, L., Kasmiarti, G., Fulignati, S., Licursi, D., Galletti, A. M. R. et al. (2024). Chemical and enzymatic hydrolysis of waste wheat bran to sugars and their simultaneous biocatalytic conversion to valuable carotenoids and lipids. *Catalysis Today*, 442, Article 114941. https://doi.org/10.1016/j.cattod.2024.114941
23. Kataleviciute, A., Plakys, G., Budreviciute, A., Onder, K., Damiati, S., Kodzius, R. (2019). A sight to wheat bran: High value-added products. *Biomolecules*, 9(12), Article 887. https://doi.org/10.3390/biom9120887
24. Song, Y., Sun, L., Zhang, S., Fan, K., Wang, H., Shi, Y. et al. (2022). Enzymes and microorganisms jointly promote the fermentation of rapeseed cake. *Frontiers in Nutrition*, 9, Article 989410. https://doi.org/10.3389/fnut.2022.989410
25. Gohil, N., Bhattacharjee, G., Kalariya, R., Pandya, V., Khambhati, K., Gohil, J. et al. (2021). Biovalorization of agro-industrial waste soybean meal for the production of prodigiosin by Serratia marcescens. *Biomass Conversion and Biorefinery*. https://doi.org/10.1007/s13399-021-02102-8
26. Mari, A., Fafalis, C., Krokida, M. (2024). Evaluation of edible coatings from components from chlorella vulgaris and comparison with conventional coatings. *Coatings*, 14(5), Article 621. https://doi.org/10.3390/coatings14050621
27. Shen, C.-H. (2019). Quantification and Analysis of Proteins. Chapter in a book: Quantification and analysis of proteins in diagnostic molecular biology. Academic Press, 2019. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802823-0.00008-0

28. Lebedeva, E. G., Panichev, A. M., Kiselev, K. V., Ryseva, Yu. Yu, Zaitseva, E. A. (2024). Taxonomic composition and physiological and biochemical properties of cultivated microorganisms isolated from kudurite rocks of the Primorsky Krai and the Republic of Altai (Russia). *The Microbe*, 5, Article 100214. https://doi.org/10.1016/j.microb.2024.100214
29. Ilesanmi, O. I., Adekunle, A. E, Omolaiye, J. A., Olorode, E. M., Ogunkanmi, A. L. (2020). Isolation optimization and molecular characterization of lipase producing bacteria from contaminated soil. *Scientific African*, 8, Article e00279. https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2020.e00279
30. Sarmah, N., Revathi, D., Sheelu, G., Rani, K. Y., Sridhar, S., Mehtab, V. (2018). Recent advances on sources and industrial applications of lipases. *Biotechnology Progress*, 34(1), 5–28. https://doi.org/10.1002/btpr.2581
31. Zhang, Y., Xia, Y., Lai, P. F.-H., Liu, X., Xiong. Z., Liu, J. et al. (2019). Fermentation conditions of serine/alkaline milk-clotting enzyme production by newly isolated *Bacillus licheniformis* BL312. *Annals of Microbiology*, 69, 1289–1300. https://doi.org/10.1007/s13213-019-01513-3
32. Aryal, S. (2022). Gelatin Hydrolysis Test — Principle, Procedure, Uses and Interpretation. Retrieved from https://microbiologyinfo.com/gelatin-hydrolysis-test. Accessed September 25, 2024
33. Dahlén, G., Hassan, H., Blomqvist, S., Carlén, H. (2018). Rapid urease test (RUT) for evaluation of urease activity in oral bacteria in vitro and in supragingival dental plaque ex vivo. *BMC Oral Health*, 18, Article 89. https://doi.org/10.1186/s12903-018-0541-3
34. Rivera-Morales, L. (2022). Catalase test for bacterial identification V.2 Retrieved from https://www.protocols.io/view/catalase-test-for-bacterial-identification-n2bvj6ozxlk5/v2. Accessed February 12, 2022.
35. Aryal, S. (2022). Citrate Utilization Test- Principle, Media, Procedure and Result Retrieved from https://microbiologyinfo.com/citrate-utilization-test-principle-media-procedure-and-result/. Accessed August 10, 2022
36. Churio, M. S., Cerletti, M., De Castro, R. E. (2022). Carotenoids from Haloarchaea: Extraction, fractionation, and characterization. Chapter in a book: Archaea: Methods and Protocols. Springer US, 2022. https://doi.org/10.1007/978-1-0716-2445-6_21
37. Annapure, U.S., Pratisha, N. (2022). Psychrozymes: A novel and promising resource for industrial applications. Chapter in a book: Microbial extremozymes novel sources and industrial applications. Academic Press, 2022. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822945-3.00018-X
38. Krikunova, L. N., Dubinina, E. V., Zakharov, M. A. Lazareva, I. V. (2021). To the question of the grain bran mineral composition evaluation. *Polzunovskiy Vestnik*, 2, 27–35. https://doi.org/10.25712/ASTU.2072–8921.2021.02.004 (In Russian)
39. Ibáñez, M.A., de Blas, C., Cámara, L., Mateos, G.G. (2020). Chemical composition, protein quality and nutritive value of commercial soybean meals produced from beans from different countries: A meta-analytical study. *Animal Feed Science and Technology*, 267, Article114531.https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2020.114531
40. Renzyaev, A.O., Kravchenko, S.N., Kryuk, R.V. (2022). Rapse cake quality increasing method in AIC. *Bulletin KSAU*, 99(186), 245–251. https://doi.org/10.36718/1819-4036-2022-9-245-251 (In Russian)
41. Raval, S. Y., Arya, P., Jain, M., Sosa, T., Trivedi, P., Dabhi, R. et al. (2024). Sustainable biosynthesis of β-carotene utilizing sugarcane bagasse: Depiction and biotechnological implications. *Biomass Conversion and Biorefinery*. https://doi.org/10.1007/s13399-024-05815-8
42. Noby, N., Khattab, S. N., Soliman, N. A. (2023). Sustainable production of bacterioruberin carotenoid and its derivatives from *Arthrobacter agilis* NP20 on whey-based medium: Optimization and product characterization. *Bioresources and Bioprocessing*, 10(1), Article 46. https://doi.org/10.1186/s40643-023-00662-3
43. White, M. F., Allers, T. (2018). DNA repair in the Archaea — an emerging picture. *FEMS Microbiology Reviews*, 42(4), 514–526. https://doi.org/10.1093/femsre/fuy020
44. Shariati, S., Zare, D., Mirdamadi, S. (2019). Screening of carbon and nitrogen sources using mixture analysis designs for carotenoid production by *Blakeslea trispora*. *Food Science and Biotechnology*, 28(2), 469–479. https://doi.org/10.1007/s10068-018-0484
45. Rodríguez, M.F., Gomez, A.P., Parra, C.M. (2022). Molecular and proteomic identification of *Arthrobacter gandavensis* isolated from cows with subclinical mastitis in a dairy farm. *Malaysian Journal of Microbiology*, 18, 309–314. https://doi/10.21161/mjm.221407
46. Jiang, Y., Song, Y., Jiang, C., Li, X., Liu, T., Wang, J. et al. (2022) Identification and characterization of *Arthrobacter nicotinovorans* JI39, a novel plant growth-promoting Rhizobacteria strain from Panax ginseng. *Frontiers in Plant Science*, 13, Article 873621. https://doi/10.3389/fpls.2022.873621
47. Özdal, M., Özdal, Ö.G., Gürkök, S. (April 18–21, 2017). *Statistical optimization of beta-carotene production by Arthrobacter agilis A17 using response surface methodology and Box-Behnken design*. AIP Conference Proceedings: II. International conference on advances in natural and applied sciences: ICANAS2017, 1833(1), Article 020101. https://doi.org/10.1063/1.4981749
48. Yu, X., Jiang, K., Zhang, W., Dong, S., Wu, Y., Zhang, G. et al. (2022). Purification, identification, and properties of a novel carotenoid produced by *Arthrobacter* sp. QL17 isolated from mount Qomolangma. *Antioxidants*, 11(8), Article1493. https://doi.org/10.3390/antiox11081493
49. Giani, M., Pire, C., Martínez-Espinosa, R. M. (2024). Carotenoid production by Haloferax mediterranei using starch residues from the candy industry as a carbon source. *Current Research in Biotechnology*, 8, Article 100265. https://doi.org/10.1016/j.crbiot.2024.100265
50. Yaderec, V.V., Karpova, N.V., Glagoleva, E.V., Petrova K. S., Shibaeva A. S., Javakhia V. V. (2024). Carotenoids: Review of major biotechnological methods and conditions for production. *Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*, 14(1), 41–54. https://doi.org/10.21285/achb.905 (In Russian)



| AUTHOR INFORMATION | СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ |
|---|---|
| **Affiliation** | **Принадлежность к организации** |
| **Natalya Yu. Sharova,** Doctor of Technical Sciences, Professor of the Russian Academy of Sciences, Deputy Director for Research, All-Russia Research Institute for Food Additives<br>55, Liteiny pr., 190000, St. Petersburg, Russia<br>E-mail: n.sharova@fncps.ru<br>ORCID: http://orcid.org/0000-0002-4208-9299<br>* corresponding author | **Шарова Наталья Юрьевна** — доктор технических наук, профессор РАН, заместитель директора по научной работе, Всероссийский научно-исследовательский институт пищевых добавок<br>190000, Санкт-Петербург, Литейный пр., 55<br>E-mail: n.sharova@fncps.ru<br>ORCID: http://orcid.org/0000-0002-4208-9299<br>* автор для контактов |
| **Artem O. Prichepa**, Junior Research Assistant, Laboratory of Biotechnology and Bioengineering, All-Russia Research Institute for Food Additives<br>55, Liteiny pr., 190000, St. Petersburg, Russia<br>E-mail: prichepa.a@yandex.ru<br>ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1037-5629 | **Причепа Артем Олегович** — младший научный сотрудник, лаборатория биотехнологий и биоинженерии, Всероссийский научно-исследовательский институт пищевых добавок<br>190000, Санкт-Петербург, Литейный пр., 55<br>E-mail: prichepa.a@yandex.ru<br>ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1037-5629 |
| **Oksana V. Astafieva**, Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher, Laboratory of structural processing of biological resources, All-Russia Research Institute for Food Additives<br>55, Liteiny pr., 190000, St. Petersburg, Russia<br>E-mail: astra39@list.ru<br>ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0187-3984 | **Астафьева Оксана Витальевна** — кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, лаборатория структурной переработки биоресурсов, Всероссийский научно-исследовательский институт пищевых добавок<br>190000, Санкт-Петербург, Литейный пр., 55<br>E-mail: astra39@list.ru<br>ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0187-3984 |
| **Nadezhda V. Kirillova**, Doctor of Biological Sciences, Professor, Department of Biochemistry, Saint Petersburg State Chemical and Pharmaceutical University of the Ministry of Healthcare of the Russian Federation<br>14, Lit. A, Professor Popov str., 197022, St. Petersburg, Russia<br>E-mail: nadezhda.kirillova@pharminnotech.com<br>ORCID: http://orcid.org/0000-0003-3379-0646 | **Кириллова Надежда Васильевна** — доктор биологических наук, профессор, кафедра биохимии, Санкт-Петербургский государственный химико-фармацевтический университет Министерства здравоохранения Российской Федерации<br>197022, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 14<br>E-mail: nadezhda.kirillova@pharminnotech.com<br>ORCID: http://orcid.org/0000-0003-3379-0646 |
| **Contribution** | **Критерии авторства** |
| **Natalya Y. Sharova:** systematization of the results of information data, writing and editing the article.<br>**Artyom O. Prichepa:** conducting research and comparative data analysis, article writing.<br>**Oksana V. Astafieva:** conducting research.<br>**Nadezhda V. Kirillova:** search for literary sources on the synthesis of pigments by microorganisms. | **Шарова Н.Ю.** — систематизация результатов информационных данных, написание и редактирование статьи.<br>**Причепа А. О.** — проведение исследований и сравнительный анализ данных, написание статьи.<br>**Астафьева О. В.** — проведение исследований.<br>**Кириллова Н. В.** — поиск литературных источников о синтезе пигментов микроорганизмами. |
| **Conflict of interest** | **Конфликт интересов** |
| The authors declare no conflict of interest. | Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. |

DOI: https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-3-386-392

Поступила 01.04.2025
Поступила после рецензирования 03.09.2025
Принята в печать 08.09.2025
© Лукин Д. Е., Вострикова Н. Л., Большакова Л. С., Куликовский А. В., Утьянов Д. А., Захарова В. А., 2025

https://www.fsjour.com/jour
Научная статья
Open access

# ПРИМЕНЕНИЕ СИАЙ-КОМПОНЕНТА ДЛЯ ОБОГАЩЕНИЯ ТОВАРНОГО ЯЙЦА ЙОДОМ

Лукин Д. Е.[1], Вострикова Н. Л.[1], Большакова Л. С.[2], Куликовский А. В.[1], Утьянов Д. А.[1]*, Захарова В. А.[1]

[1] Федеральный научный центр пищевых систем им. В. М. Горбатова, Москва, Россия
[2] Среднерусский институт управления — филиал Российской академии народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации, Орел, Россия

*КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:*
*СиАй-компонент, йодированный молочный белок, йод, йодтирозины, обогащенное яйцо*

АННОТАЦИЯ

В составе йодированных молочных белков, содержащих йодтирозины, есть ковалентно связанный с атомом углерода йод. Авторы предложили для него термин «СиАй», обозначающий перспективный источник безопасного «органического» йода в кормах для сельскохозяйственной птицы. Цель использования этого компонента — получение функционального продукта, обогащенного связанным йодом, а именно — товарного яйца. В работе представлены исследования влияния связанного йода (СиАй-компонент), включенного в корм кур-несушек, на содержание в яйцах общего йода, йодтирозинов, а также на баланс поступления и накопления йода в яйцах. Опыт проводился в течение 8 недель на курах-несушках кросса Lohman-lsl-classic. Птица контрольной группы на протяжении всего эксперимента получала комбикорм, содержащий йод в форме йодата кальция из расчета 1 мг/кг корма. Курам опытной группы дополнительно к основному рациону вводился СиАй-компонент. С 1 по 28 день количество йода, добавляемого в корм птицы опытной группы в составе йодированных молочных белков (ЙМБ), составляло 0,5 мг/кг корма, а с 29 по 56 день — 0,7 мг/кг корма. В желтке и белке яйца определяли содержание общего йода методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой, количество моно- и дийодтирозинов — методом высокоэффективной жидкостной хроматографии с масс-спектрометрическим детектированием. Установлено, что включение в рацион кур-несушек ЙМБ, содержащих СиАй-компонент, позволяет получить яйца с высоким содержанием (50–74 мкг/в яйце) йода, что значительно превышает значения контроля (14,99 мкг в яйце). Йод в яйце находится по большей части (75 %) в связанной, «органической» форме в виде моно- и дийодтирозинов. Степень усвоения йода при поступлении его в организм птицы в виде йодтирозинов составляет 25–32 %, что значительно превышает данный показатель при использовании неорганической формы йода (11 %). Отмечено отсутствие побочных эффектов для птицы и улучшение ее здоровья, в первую очередь репродуктивной системы. Эксперимент с поением кур-несушек водой, обогащенной моно- и дийодтирозинами, также показал положительный эффект в накоплении йода в яйцах. Эксперимент по оценке сохранности моно- и дийодтирозинов в яйцах после термической обработки подтвердил их высокую устойчивость к воздействию высоких температур. Степень сохранности составила 91 %.

**Received 01.04.2025**
**Accepted in revised 03.09.2025**
**Accepted for publication 08.09.2025**
© Lukin D. E., Vostrikova N. L., Bolshakova L. S., Kulikovskii A. V., Utyanov D. A., Zakharova V. A., 2025

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

# APPLICATION OF THE CI COMPONENT TO ENRICH MARKETABLE EGGS WITH IODINE

Dmitry E. Lukin[1], Natalia L. Vostrikova[1], Larisa S. Bolshakova[2], Andrey V. Kulikovskii [1], Dmitry A. Utyanov[1]*, Varvara A. Zakharova[1]

[1] V. M. Gorbatov Federal Research Center for Food Systems, Moscow, Russia
[2] Central Russian Institute of Management — branch Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration, Orel, Russia

*KEY WORDS:*
*CI component, iodized milk protein, iodine, iodotyrosines, enriched egg*

ABSTRACT

The composition of iodized milk proteins containing iodotyrosines has iodine covalently bonded to the carbon atom. The authors proposed a term “CI” for it, which denotes a promising source of safe “organic” iodine in feedstuff for poultry. The aim of using this component is production of a functional product enriched with bonded iodine, namely, marketable eggs. The paper presents investigations of an effect of bonded iodine (CI component) included in the feedstuff for laying hens on the content of total iodine and iodotyrosines in eggs as well as on the balance of intake and accumulation of iodine in eggs. The experiment was carried out for eight weeks on laying hens of Lohman-lsl-classic cross. Birds of the control group received combined feed containing iodine in the form of calcium iodate on the basis of 1 mg/kg feed during the whole experiment. The hens of the experimental group received the CI component in addition to the basic diet. From the 1st to the 28th day, an amount of iodine added to the feedstuff of the birds of the experimental group in the composition of iodized milk proteins (IMP) was 0.5 mg/kg feed, and from the 29th to the 56th day it was 0.7 mg/kg feed. The content of total iodine was determined in egg yolk and white by inductively coupled plasma mass spectrometry, amounts of mono- and di-iodotyrosines by high-performance liquid chromatography with mass spectrometry detection. It has been found that inclusion of IMP containing the CI component into the diet of laying hens allows obtaining eggs with a high content (50–74 μg/egg) of iodine, which was significantly higher than the values in the control (14.99 μg/egg). Iodine in eggs was mainly (75 %) in bonded, “organic” form as mono- and di-iodotyrosines. A level of iodine assimilation upon its entry into the bird’s body in a form of iodotyrosines was 25–32 %, which is significantly higher than this indicator when the inorganic iodine form was used (11 %). An absence of side

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: **Лукин, Д. Е., Вострикова, Н. Л., Большакова, Л. С., Куликовский, А. В., Утьянов, Д. А., Захарова, В. А.** (2025). Применение сиай-компонента для обогащения товарного яйца йодом. *Пищевые системы*, 8(3), 386–392. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-3-386-392

FOR CITATION: **Lukin, D. E., Vostrikova, N. L., Bolshakova, L. S., Kulikovskii, A. V., Utyanov D. A., Zakharova, V. A.** (2025). Application of the CI component to enrich marketable eggs with iodine. *Food Systems*, 8(3), 386–392. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-3-386-392

effects for birds and improvement of their health, first of all, the reproduction system was noticed. The experiment on laying hen watering using water enriched with mono- and di-iodotyrosines also showed a positive effect in terms of accumulation of iodine in eggs. The experiment on assessment of preservation of mono- and di-iodotyrosines in eggs after heat treatment supported their high stability to an effect of high temperatures. A degree of preservation was 91 %.

## 1. Введение

Актуальнейшей задачей для мирового сообщества, обозначенной такими институтами, как ООН, ВОЗ и ЮНЕСКО, является ликвидация дефицита йода в питании человека и животных. Йодная недостаточность лежит в основе более чем 300 заболеваний. При этом число людей, страдающих от дефицита йода или находящихся в зоне риска, ежегодно растет и, по оценкам ВОЗ, приближается к 3 миллиардам. В России фактически все население сталкивается с нехваткой этого важнейшего микроэлемента.

Адекватный уровень потребления биодоступного йода при отсутствии побочных эффектов является важнейшим условием сохранения здоровья человека. Йод играет ключевую роль в обеспечении здоровья будущих поколений, в нормальном развитии плода, влияет на здоровье матери и на когнитивные способности. Нехватка природных, так называемых «органических» соединений йода в продуктах питания приводит к развитию йододефицитных заболеваний, имеющих серьезные медико-социальные последствия, что обуславливает необходимость реализации мер по их профилактике [1,2].

Поскольку одним из основных физиологических источников поступления йода для человека являются продукты питания животного происхождения, во многих странах коррекция содержания йода в пище осуществляется путем производства обогащенных продуктов питания (яиц, молока, мяса) посредством интенсивного внесения неорганических форм йода в рационы кормления животных, что негативно отражается на самих животных [3].

В последнее время (особенно в странах с развивающейся экономикой) спрос на массовые продукты потребления, такие как, например, куриные яйца, возрастает с каждым годом. Отменяются рекомендации по сокращению их потребления из-за значительного содержания насыщенных жиров (3 г/100 г) и холестерина (200–300 мг/100 г). Рост производства товарного яйца связан не только с увеличением его потребления населением, но и с расширением использования его компонентов в пищевой и других отраслях промышленности. Товарное яйцо как пищевой продукт для массового потребления отличается простотой производства, логистики и хранения. Оно является природным источником для обогащения рациона человека базовыми эссенциальными микроэлементами, например, йодом, методом *in vivo*.

Обогащение пищевых яиц йодом — перспективное направление в практике птицеводства [4,5]. Йодированные яйца кур широко представлены в торговой сети в качестве самостоятельного бренда. Заявляемое производителями содержание йода в яйцах колеблется в достаточно широких пределах и составляет от 15 до 50 мкг/яйцо. Это является номинальной оценкой, поскольку все расчеты для потребителя представлены на 100 г продукта, что затрудняет перерасчет на каждое яйцо. Реальное содержание йода в отдельно взятом яйце может быть ниже заявленного на 10–60 % [4]. Это обусловлено прежде всего технологическими особенностями их производства, а также токсичностью предлагаемых форм йода, что несовместимо при длительном их применении и получении стабильного конечного продукта.

Для получения достаточного количества йода в яйце необходимо увеличить содержание элемента в корме птицы. Европейское агентство по безопасности пищевых продуктов (EFSA) установило максимальный уровень содержания йода в кормах для кур-несушек — 3 мг/кг сухого вещества корма [6]. В рационе сельскохозяйственной птицы в качестве источника йода чаще всего применяют минеральные соли (преимущественно йодиды и йодаты). Основная проблема в йодировании яиц с использованием неорганических форм йода заключается в невозможности поддерживать стабильное содержание йода в яйце. Кроме того, 3–5-кратное превышение содержания йода в корме по сравнению с физиологической нормой отрицательно влияет на здоровье и сохранность кур-несушек и приводит к деформации яиц.

Таким образом, обогащение товарного яйца органическими формами йода путем включения их в рацион кур-несушек представляется перспективным направлением для научных исследований. Этот подход позволяет одновременно решать две задачи: обеспечивать сельскохозяйственную птицу органическим йодом, что положительно сказывается на её здоровье, и накапливать органический йод в товарном яйце. В результате йод становится более доступным для конечного потребителя. Один из вариантов обогащения рациона кур-несушек органическими формами йода — использование йодированных молочных белков, в которых йод связан с углеродом ковалентной связью (далее — СиАй-компонент). В частности, в настоящей работе исследовалось накопление СиАй-компонента в форме моно- и дийодтирозина.

В работах, посвященных обогащению товарного яйца СиАй-компонентом через кур-несушек, очень важным вопросом является метаболизм и аккумуляция йода в яйце. Накопление органического йода в яйцах кур — сложный физиологический процесс, который зависит от метаболизма йода в организме птицы, от его транспорта и от включения в структуры яйца. Основные этапы этого процесса:

1. Поглощение и всасывание йода в ЖКТ. Органические формы йода (например, йодированные аминокислоты, йодсодержащие дрожжи, экстракты водорослей) расщепляются в кишечнике под действием ферментов [7,8]. Йод, связанный с аминокислотами (например, 3,5-дийодтирозин), может всасываться через аминокислотные транспортные системы. Йод из органических источников (например, ламинарии) высвобождается в виде йодида ($I^-$) или йодата ($IO_3^-$) после ферментативного гидролиза.

   Биодоступность органического йода часто выше, чем неорганического (например, KI, $KIO_3$), так как органические соединения защищены от окисления и лучше усваиваются.
2. Транспорт йода в организме. В крови йод связывается с альбуминами и транспортируется к тканям. Щитовидная железа активно захватывает йод для синтеза гормонов (тироксина T4 и трийодтиронина T3), но при избытке йода в рационе у птицы его основная часть выводится через почки и накапливается в яйцах.
3. Депонирование йода в яйце. Йод накапливается преимущественно в желтке, реже — в белке. В желтке йод включается в состав вителлогенина — предшественника желточных белков, синтезируемого в печени под влиянием эстрогенов [9].

   Вителлогенин связывается с йодом и транспортируется в яичник, где преобразуется в липовителлин и фосвитин — основные компоненты желтка. Органический йод может напрямую включаться в структуру фосфолипидов или йодсодержащих аминокислот желтка.

   В белке небольшая часть йода связывается с овальбумином и другими протеинами яичного белка, но его концентрация здесь обычно ниже, чем в желтке [10].
4. Факторы, влияющие на накопление.
   - Форма йода: органические соединения (например, йодсодержащие дрожжи) часто обеспечивают более стабильное и длительное депонирование йода в яйце по сравнению с неорганическими солями.
   - Дозировка: оптимальная доза в корме — 2–5 мг йода/кг. Избыток (> 10 мг/кг) может подавлять яйценоскость и вызывать токсикоз. Длительность кормления: накопление йода в яйцах достигает плато через 2–3 недели регулярного потребления обогащенного корма.
   - Физиология кур: уровень эстрогенов влияет на синтез вителлогенина, а состояние печени и почек — ключевых органов детоксикации — также оказывает влияние на накопление йода в яйцах [11].
5. Пример физиологического пути: Корм → Органический йод (например, йодказеин) → Расщепление в кишечнике → Всасывание как йодид ($I^-$). Кровь → Транспорт к печени → Включение в вителлогенин. Печень → Секреция вителлогенина в кровь → Поглощение яичником. Яичник → Накопление йода в развивающемся желтке → Формирование яйца [12].

Так, исследования Wright и соавторов [13] показывают, что органический йод увеличивает концентрацию йода в желтке на 20–40 % по сравнению с неорганическими аналогами. Биодоступность органического йода выше, так как он меньше взаимодействует с антагонистами (например, гойтрогенами в корме).

Эффективность внесения йода в корм кур-несушек наглядно продемонстрирована в работе [14], в которой исследовали накопление железа и йода в яйцах при внесении этих элементов в рацион. В исследовании показано, что добавление йода в рацион птицы приводит к накоплению йода в желтке и скорлупе. Однако авторы

отмечают, что в процессе накопления йода в яйцах важную роль играет также железо, при этом само железо не накапливается в яйцах в течение эксперимента, в то время как количество йода в яйцах увеличивается с течением эксперимента.

Технология СиАй обогащения, использованная при выполнении настоящей работы, предусматривает универсальный способ внесения обогащающего компонента СиАй на любом этапе откорма. Данная форма сохраняет свои свойства при различных технологических процессах обработки, не влияет на химические реакции в кормах и на биохимические процессы в организме животного, благодаря чему доходит до человеческого организма в целостном виде.

Целью настоящего эксперимента являлось изучение влияния йодированного молочного белка, включенного в корм кур-несушек, на содержание в яйцах йода в ковалентно связанной стабильной форме йода. В рамках поставленной цели определялось содержание общего йода и йодтирозинов в яйцах, а также рассчитывался баланс поступления и накопления связанного йода в яйцах и его сохранность при термической обработке.

## 2. Объекты и методы

Объектом исследования являлся йодированный молочный белок (ЙМБ) производства ООО «Биокинетикс», Россия. Способ получения ЙМБ запатентован и применяется как на отечественном рынке, так и за рубежом. Для его производства используются сывороточные белки коровьего молока. Под воздействием ферментов йод встраивается в молекулу тирозина, образуя монойодтирозин (МИТ) и дийодтирозин (ДИТ). Общего йода в ЙМБ содержится 2 %, ДИТ — 0,64 %, МИТ — 1,32 %. Также исследуется технология обогащения товарного яйца ковалентно связанным йодом, компонентом СиАй и ее применение в производстве функциональных яиц. Данная технология также запатентована[1].

Опыт по внесению в сухой корм связанного йода был проведен на базе ЗАО «Агрокомплекс “Оредеж”». Для исследования были взяты куры-несушки кросса ЛОМАНН ЛСЛ-КЛАССИК (Lohman-lsl-classic) в возрасте 240 дней, длительность опыта составила 8 недель. Птица содержалась в клеточных батареях, получала комбикорм, сбалансированный по основным питательным веществам. Среднее потребление корма одной курицей-несушкой составляло 135 г в сутки.

Птица контрольной группы на протяжении всего эксперимента получала комбикорм, содержащий йод в форме йодата кальция из расчета 1 мг йода на 1 кг корма. Курам опытной группы дополнительно к основному рациону вводился ЙМБ. В первый период (с 1 по 28 день) количество йода, добавляемого в корм птицы опытной группы в составе ЙМБ, составляло 0,5 мг/кг корма, а во второй период (с 29 по 56 день) — 0,7 мг/кг корма.

Яйца для анализа отбирались 1–2 раза в неделю по 20 штук в ходе всего опыта.

Количество усвоенного йода рассчитывали как отношение количества йода, содержащегося в яйце, к количеству йода, потребленного с кормом.

Опыт по внесению связанного йода путем поения был осуществлен на частном фермерском подворье Липецкой области с. Долгоруково. Для исследования были взяты куры-несушки породы РОД-АЙЛАНД в возрасте 200–220 дней, длительность опыта составила 6 дней. Птица содержалась в свободных вольерах, получала воду для питья. Среднее потребление одной курицей-несушкой воды для питья составляло около 0,5 л в сутки. При этом количество йода, поступавшего с питьевой водой, составляло около 120 мкг, что превышало показатели первого эксперимента. Одной из задач стало продемонстрировать управляемость содержания йода в одном яйце и безопасность такого подхода для основного стада. Расчетной величиной для внесения кормовой добавки в рацион стала 10–15 г на 1 т воды. Яйца для исследований отбирались по 1 яйцу в день от трех разных несушек на протяжении 5 дней (со вторых по шестые сутки).

Содержание общего йода определяли методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой, в соответствии с ГОСТ 34633-2020[2] на приборе Agilent 5110 ICP-OES (Agilent Technologies Inc., USA); содержание моно- и дийодтирозинов в желтке и белке определяли методом высокоэффективной жидкостной хроматографии с использованием хроматографа Agilent 1200C (Agilent Technologies Inc., USA) с масс-спектрометрическим детектором Agilent 6410 Triple Quad LC/MS (Agilent Technologies Inc., USA) [15]. Количество усвоенного йода рассчитывали как отношение количества йода, содержащегося в яйце, к количеству йода, потребленного с кормом.

Для расчетов использовалась программа STATISTICA 10, результаты представлялись в виде «Mean ± SD», статистическую достоверность рассчитывали с применением дисперсионного анализа (ANOVA) с применением критерия Стьюдента. Вероятность 0,05 была выбрана в качестве значимого уровня.

## 3. Результаты и обсуждение

На Рисунках 1 и 2 приведена динамика содержания йода в белке и желтке соответственно на протяжении эксперимента по обогащению корма.

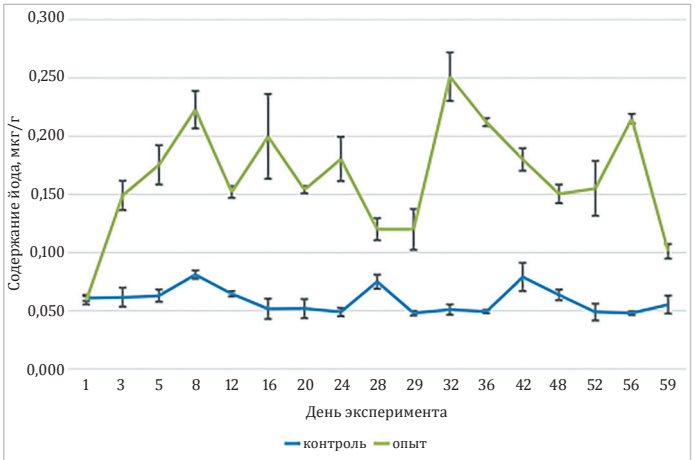



Рисунок 1. **Динамика аккумулирования концентрации йода в белке**

Figure 1. **Dynamics of accumulation of iodine concentration in egg white**

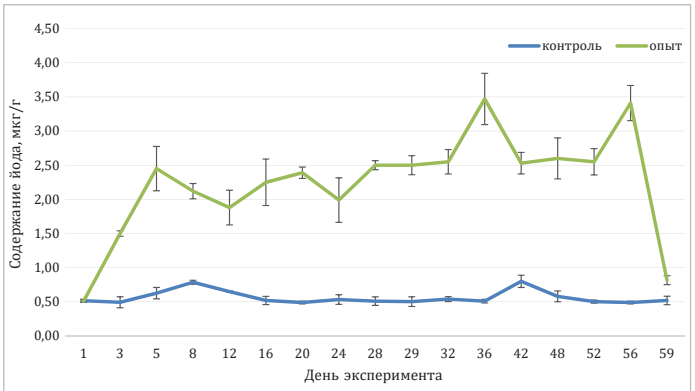



Рисунок 2. **Динамика аккумулирования концентрации йода в желтке**

Figure 2. **Dynamics of accumulation of iodine concentration in yolk**

Как видно из Рисунка 1, уже в первую неделю эксперимента концентрация йода в белке превысила показатели контрольной группы более чем в 2 раза. Увеличение содержания йода в органической форме в корме с 0,5 мкг/г до 0,7 мкг/г во втором периоде эксперимента привело сначала к увеличению содержания йода в белке, но в последующие дни показатель практически вернулся к значениям первого периода.

Представленные на Рисунке 2 результаты показывают, что увеличение концентрации йода в желтке, так же как в белке, происходит в первые же дни после включения в рацион кур-несушек ЙМБ и достигает 2,35 мкг/г, что в 4 раза превышает значения контроля. Во втором периоде эксперимента продолжается рост концентрации йода в желтке, при этом среднее значение показателя превышает аналогичный показатель первого периода на 50 %.

Необходимо подчеркнуть, что концентрация йода как в белке, так и в желтке снижалась практически до контрольных значений уже через 3 дня после исключения йодированного молочного белка из корма (59 день).

В Таблице 1 приведены средние значения содержания йода в белке, желтке и яйце двух периодов эксперимента для опытной группы и на протяжении всего эксперимента для контрольной группы. Средняя масса белка ≈ 40,0 г, желтка ≈ 22,0 г.

[1] Лукин Д. Е., Рублев А. В., Большакова Л. С., Способ производства пищевых яиц, обогащенных ковалентно связанным йодом. Патент № 2714725 RU.

[2] ГОСТ 34633-2020 «Продукция пищевая. Определение массовой доли хрома, железа, никеля, меди, цинка методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой» М.: Российский институт стандартизации, 2024. — 23 с.

Таблица 1. **Содержание йода в яйце**
Table 1. **Iodine content in eggs**

| Содержание йода | Группа | | |
|---|---|---|---|
| | контрольная | опытная (1–28 день) | опытная (29–56 день) |
| В белке | 2,36 ± 0,51 | 6,62 ± 1,24[a] | 7,59 ± 1,56[a] |
| В желтке | 12,63 ± 2,31 | 44,24 ± 8,36[a] | 66,44 ± 10,09[ab] |
| В яйце, мкг/шт | 14,99 ± 1,88 | 50,86 ± 8,17[a] | 74,03 ± 10,1[ab] |
| Количество усвоенного йода в яйце, % от введенного | 11,1 | 25,1 | 32,3 |

*Примечание*: результаты представлены в виде «среднее значение ± стандартное отклонение». Среднее значение для контрольной группы рассчитывалось на протяжении всего периода эксперимента. Среднее значение для опытной группы рассчитывалось в периоды с 3 по 28 день и с 29 по 56 день. Стандартное отклонение показывает точность метода. [a] — отличия статистически значимы по сравнению с контролем (уровень значимости $\alpha = 0,05$); [b] — отличия статистически значимы по сравнению с опытной группой (1–28 день) (уровень значимости $\alpha = 0,05$).

Согласно данным Таблицы 1, в первый период опыта содержание йода в белке, желтке и в целом в яйце значимо отличается от контрольного, превышая его более чем в 3 раза на следующий день после кормления. Во втором периоде эксперимента среднее содержание йода в яйце оказалось в 4,9 раза выше контрольного. Расчет баланса поступления и накопления йода в яйцах показал, что у кур-несушек, получавших йод в виде ЙМБ, степень усвоения микроэлемента значительно выше, чем в контрольной группе. Причем СиАй-компонент, находящийся в корме, не изменялся и в яйце, что свидетельствует об отсутствии трансформации химических связей в организме птицы и о прохождении печеночного барьера.

Поскольку целью работы было изучение накопления йода в товарном яйце именно в органической форме, в рацион кур-несушек компонент СиАй вносился через йодированные молочные белки, где йод связан с аминокислотой тирозином. В связи с этим представлял интерес вопрос содержания в образцах МИТ и ДИТ. Для исследований отбирались яйца в течение первого этапа эксперимента (т. е. с 3 по 28 сутки) и анализировались на уровни МИТ и ДИТ. По результатам анализа было рассчитано содержание йода в форме МИТ, в форме ДИТ, а также общее содержание йода в органической форме.

Таблица 2. **Содержание МИТ и ДИТ в яйце**
Table 2. **Content of mono- and di-iodotyrosines in eggs**

| Показатель | Результаты испытаний |
|---|---|
| Количество МИТ | 108,40 ± 21,68 мкг/100 г |
| | 63,09 ± 12,62 мкг/яйцо |
| Количество ДИТ | 45,76 ± 5,49 мкг/100 г |
| | 26,63 ± 3,20 мкг/яйцо |
| Количество ковалентно связанного йода в форме МИТ | 25,87 мкг/яйцо |
| Количество ковалентно связанного йода в форме ДИТ | 12,78 мкг/яйцо |
| Количество органически-связанного йода | 38,65 мкг/яйцо |
| Доля органически-связанного йода от общего йода | 75,99 % |

*Примечание*: результаты представлены в виде «среднее значение ± относительная погрешность». Среднее значение рассчитывалось в период с 3 по 28 день. Относительная погрешность для МИТ — 20 %, для ДИТ — 12 %.

Как видно из Таблицы 2, йод в органически-связанном виде в контрольной группе составляет около 75 %, из которых примерно 50 % приходится на монойодтирозин и 25 % — на дийодтирозин. Это соотношение примерно соответствует пропорции МИТ: ДИТ 2:1, наблюдаемой в йодированном молочном белке.

В Таблице 3 приведены результаты накопления МИТ и ДИТ в яйце в результате эксперимента по обогащению рациона кур-несушек органическим йодом через поение. Для исследований в каждый день эксперимента отбиралось по 3 яйца.

Результаты, приведенные в Таблице 3, показывают, что добавление в питье кур-несушек СиАй-компонента положительно сказывается на накоплении йода в товарном яйце. Значительное увеличение содержания МИТ и ДИТ в яйце наблюдается уже на третьи сутки эксперимента. В результатах эксперимента по поению можно выделить три аспекта, на которые важно обратить внимание:

- неравномерность накопления МИТ и ДИТ. МИТ накапливается в яйце плавно, а резкое увеличение его наблюдается на 6 сутки эксперимента, в то время как «резкие» скачки в накоплении ДИТ отмечаются на 3 и 5 сутки эксперимента;
- в яйце в большем количестве накапливается ДИТ, а не МИТ, как это было в эксперименте с кормлением кур-несушек йодированным молочным белком;
- уже на 6 сутки эксперимента в одном яйце накапливается йод на уровне 30 % от суточной потребности человека. И это йод только в форме МИТ и ДИТ.

Содержание йода в куриных яйцах зависит от количества йода, потребленного птицей с кормом, но при условии, что йод находится в связанной форме и представляет СиАй-компонент. Многие исследователи наблюдали линейную зависимость концентрации йода в яйце от его концентрации в корме кур-несушек [11,15,16]. Так, при содержании йода в количестве 0,8; 2,9; 5,2; 11,1 и 21,5 мг/кг корма обнаруживалось 48, 107, 180, 290 и 511 мкг/кг йода в яичном белке и 443, 664, 1122, 1953 и 3352 мкг/кг йода в яичном желтке, что соответствует 8,3; 12,5; 21,1; 36,69 и 62,99 мкг йода в яйце [17]. Добавление в рацион птицы йода в количестве 0,5; 1, 2 и 5 мг/кг корма позволило достичь содержания йода в яйце в количестве 17,7; 27,3; 38 и 65,6 мкг [18]. При этом следует отметить, что увеличение содержания йода в корме, например, в 2 раза не приводило к аналогичному увеличению содержания йода в яйце. В эксперименте введение 1 мг йода/кг корма обеспечивало 27,3 мкг йода в яйце, а при увеличении содержания йода в корме до 2 мг/кг в яйце определялось 38 мкг йода [19]. При этом следует отметить, что подобные эксперименты проводились однократно, без длительного кормления, и, очевидно, с целью получения больших концентраций йода в яйце [20]. При этом не учитывалось состояние здоровья птицы и ее продуктивность. В нашем исследовании увеличение количества йода в корме на 50 % и 70 % за счет йодированного молочного белка позволило увеличить содержание йода в яйце в 3,3 раза и 4,9 раза соответственно. При этом были отмечены улучшения репродуктивной системы птицы, а также ее показателей продуктивности.

Товарное яйцо обогащается микронутриентами разными способами. Что касается йода, наиболее распространенный способ обогащения — это использование неорганических форм йода в виде йодатов и йодидов калия и органических форм в виде йодированных дрожжей. В работе [8] показано, что при использовании йодированных дрожжей удается получить значение содержания йода почти в два раза превышающее значение при использовании неорганического йода. Значения содержания йода в настоящей работе в 1,2 раза выше, чем при обогащении яйца йодированными дрожжами. Это говорит о большей

Таблица 3. **Содержание МИТ и ДИТ в яйце по результатам эксперимента по поению**
Table 3. **Content of mono- and di-iodotyrosines in eggs by the results of the experiment on watering**

| Показатель | Результаты испытаний, мкг/шт | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | На 2-й день | На 3-й день | На 4-й день | На 5-й день | На 6-й день |
| Количество МИТ | 2,50 ± 0,50 | 3,50 ± 0,70[a] | 4,10 ± 0,82[ab] | 5,05 ± 1,01[abc] | 35,71 ± 7,14[abcd] |
| Количество ДИТ | 4,73 ± 0,57 | 15,40 ± 1,85 [a] | 17,84±2,14 [a] | 52,42±6,29 [abc] | 63,45 ± 7,61 [abcd] |
| Количество йода в одном яйце в форме МИТ | 1,03 | 1,44 | 1,68 | 2,07 | 14,64 |
| Количество йода в одном яйце в форме ДИТ | 2,27 | 7,39 | 8,56 | 25,16 | 30,46 |
| Общее количество органически-связанного йода | 3,30 | 8,83 | 10,24 | 27,23 | 45,10 |
| % от суточной потребности для человека | 2,2 | 5,9 | 6,8 | 18,2 | 30,1 |

*Примечание*: результаты представлены в виде «среднее значение трех параллельных измерений ± относительная погрешность».
[a] — отличия статистически значимы по сравнению со вторым днем (уровень значимости $\alpha = 0,05$);
[b] — отличия статистически значимы по сравнению с третьим днем (уровень значимости $\alpha = 0,05$);
[c] — отличия статистически значимы по сравнению с четвертым днем (уровень значимости $\alpha = 0,05$);
[d] — отличия статистически значимы по сравнению с пятым днем (уровень значимости $\alpha = 0,05$). Относительная погрешность для МИТ — 20 %, для ДИТ — 12 %.

эффективности йода в форме МИТ и ДИТ. Вероятно, это связано с тем, что йод в форме МИТ и ДИТ более стабилен, в таком случае его отщепление возможно только ферментативно [21]. Йод в неорганической форме тоже может быть эффективен в вопросах обогащения яиц через рацион кур несушек. Что продемонстрировано в работе [22], в которой йодом в форме йодата кальция обогащали корма до концентраций 5, 10, 15 и 20 мг/кг. Согласно результатам, зависимость содержания йода в яйцах от йода в корме не была прямо пропорциональна, наибольшие значения йода в яйцах удалось достичь при его концентрациях в корме на уровнях 10 и 15 мг/кг. Такие уровни намного выше «оптимального» уровня, который был подобран в работе [23], в которой йод в корма добавляли до концентраций 0,3; 0,6; 1,2; 2,4; 4,8 и 9,6 мг/кг, и наиболее эффективной оказалась концентрация в 2,4 мкг/кг. Эти работы в очередной раз подчеркивают, что йод в неорганической форме в больших концентрациях токсичен для организмов кур-несушек. Начиная от концентраций йода в корме на уровне 6,07 мг/кг возможно снижение яйценоскости и массы яиц, а концентрации свыше 12 мг/кг корм снижают индекс Хау [18,24]. Исследованный же в настоящей работе йод в форме МИТ и ДИТ не оказывает негативного влияния на здоровье и жизненные показатели кур-несушек, что делает его более предпочтительной добавкой для обогащения рациона птиц. Преимущества обогащения яиц микроэлементами в связанной с органическими соединениями форме показаны в работе [25] — яйца от кур-несушек, рацион которых был обогащен селеном, связанным с метионином, были менее подвержены порче. Селен, попадая в яйца, увеличивает прочность мембраны желтка, что в свою очередь приводит к снижению миграции воды в желтках, а pH медленнее повышается в процессе хранения яиц, сохраняя качество на более длительный период [25,26]. Существует вероятность того, что йод, накопленный в яйцах в форме МИТ и ДИТ, тоже может оказывать влияние на сохранение качества яиц, поэтому в дальнейшем необходимы соответствующие исследования.

Учитывая, что яйца употребляются в пищу после термической обработки, представляло интерес изучение вопроса сохранности МИТ и ДИТ в яйцах после варки. Для эксперимента были отобраны по три яйца в первый период кормления для контрольной и опытной групп. В контрольной группе исследовали содержание МИТ и ДИТ в сырых белке и желтке, яйца опытной группы варили в течение 15 минут, после чего смотрели содержание МИТ и ДИТ в белке и яйце. Результаты данного эксперимента приведены в Таблице 4.

Таблица 4. **Содержание МИТ и ДИТ в яйце до и после термообработки**

Table 4. **Content of mono- and di-iodotyrosines in eggs before and after heat treatment**

| Показатель | контроль | опыт | % сохранности |
|---|---|---|---|
| МИТ в белке, мкг | 6,37 ± 1,27 | 6,68 ± 1,34 | – |
| ДИТ в белке, мкг | 2,99 ± 0,36 | 2,87 ± 0,34 | 95,99 |
| МИТ в желтке, мкг | 50,20 ± 10,04 | 44,29 ± 8,86 | 88,23 |
| ДИТ в желтке, мкг | 25,01 ± 3,00 | 23,52 ± 2,82 | 94,04 |
| Содержание МИТ и ДИТ, мкг/яйцо | 84,57 | 77,36 | 91,48 |
| Содержание йода в органически-связанной форме, мкг/ яйцо | 36,63 | 33,57 | 91,65 |

*Примечание:* результаты содержания МИТ и ДИТ в белке и желтке представлены в виде «среднее значение трех параллельных измерений ± относительная погрешность». Из них рассчитано содержание МИТ и ДИТ в яйце и содержание органически-связанного йода. Относительная погрешность для МИТ — 20 %, для ДИТ — 12 %.

Как видно из результатов, приведенных в Таблице 4, термическая обработка яйца, а именно варка, не оказывает сильного влияния на содержание МИТ и ДИТ. Наименьшая степень потери отмечается у ДИТ в белке — его сохранилось почти 96 %. Содержание ДИТ в желтке аналогично уменьшилось незначимо и после термообработки составило 94 %. Наибольшие потери наблюдаются в количестве МИТ в желтке –порядка 12 %. В ходе эксперимента количество МИТ в белке после варки было обнаружено больше, чем в белке до варки. Вероятнее всего, это связано с тем, что изначально в белке яиц опытной группы его было больше, чем в белке яиц контрольной группы. Поэтому оценить степень потери МИТ в белке при термической обработке не представляется возможным. В среднем МИТ и ДИТ показали высокую степень сохранности в яйцах при их термической обработке, их сохранилось в продукте ≈91,5 %. Высокая степень сохранности МИТ и ДИТ говорит и о высокой степени сохранности именно органически-связанного йода — 91,65 %. Согласно литературным данным, потери йода в яйце после варки происходят в основном в белке, а в желтке его потери составляют до 10 % при такой термической обработке [21]. Однако в работе [11] показано, что после термической обработке яиц кур-несушек, потреблявших обогащенный йодом рацион, не было статистически значимой разницы в содержании йода. В настоящей же работе была оценена сохранность йода в форме МИТ и ДИТ. Несмотря на то, что потеря МИТ и ДИТ возможна при варке, процент сохранности очень высокий. Более того, можно сказать, что обогащение яйца именно йодтирозинами позволяет практически полностью сохранить его количество в белке.

Полученные в ходе выполнения настоящей работы данные свидетельствуют о более высокой степени усвоения связанного йода (СиАй-компонента) при введении его в виде йодтирозинов (25 % и 32 %) по сравнению с неорганическими соединениями (11 %) или клатратами.

При определении йодтирозинов было установлено, что входящий в их состав йод составляет ≈76 % от общего йода, содержащегося в яйце, т. е. в яйцах йод по большей части представлен в «органической» форме — в виде моно- и дийодтирозинов.

Таким образом, установлено, что включение в рацион кур-несушек йодированного молочного белка, содержащего компонент СиАй, позволяет получить яйца со значительным количеством (50–74 мкг/яйцо и более) связанного йода. Степень усвоения йода при поступлении его в организм птицы в «органической» форме (в виде йодтирозинов) превышает данный показатель при использовании неорганической формы йода, при этом являясь нетоксичным и безопасным как для птицы, так и для человека. Также была установлена сохранность СиАй-компонента в составе моно- и дийодтирозинов при термической обработке яиц, что позволяет получить функциональный продукт. Такой продукт может способствовать решению общенациональной проблемы — ликвидации йоддефицитных состояний у населения страны с использованием доступной массовой технологии СиАй-обогащения.

## 4. Выводы

Каждый этап проведенного эксперимента по изучению обогащения рациона кур-несушек ЙМБ показал выраженные положительные результаты. В ходе основной части эксперимента удалось достичь высокого уровня накопления йода в яйцах, получаемых от кур, рацион которых обогащен МИТ и ДИТ. Динамика накопления йода в белке и желтке показывает, что «стандартные» нормы содержания йода в кормах недостаточны для правильного функционирования организма птицы, т. к. заметное увеличение содержания йода в яйцах начинается только с пятых суток. Соответственно, справедливо предположение, что в период до пятых суток «избыток» йода используется организмом для ликвидации йододефицита, после чего уже происходит его накопление непосредственно в яйцах. Результаты по определению содержания МИТ и ДИТ показали, что большая часть йода в яйце аккумулируется именно в этой форме, что более благоприятно для потребителя.

Положительные результаты отмечены и в эксперименте по поению кур-несушек обогащенной МИТ и ДИТ водой. Причем накопление МИТ и ДИТ в яйцах в таком случае теоретически может происходить быстрее, чем при откорме обогащенным рационом. Однако и накопление происходит не так равномерно, как при откорме. Несмотря на довольно положительный результат, данное направление требует проведения дополнительных исследований. В частности, этот эксперимент следует проводить в течение более длительного периода, чтобы определить, когда накопление МИТ и ДИТ в яйцах достигнет плато, а также до каких максимальных концентраций можно обогатить яйца данным способом.

Результаты оценки сохранности МИТ и ДИТ в яйцах после термической обработки свидетельствуют о высокой эффективности выбранного метода. После варки яиц в течение 15 минут в кипящей воде (что почти в полтора раза превышает среднюю продолжительность варки яйца) содержание йода в органически связанной форме сохранилось на уровне около 92 %. Это показывает высокую стабильность СиАй-компонента, использованного для эксперимента. Однако в данной области необходимы дальнейшие исследования, а именно — определение степени стабильности МИТ и ДИТ в обогащенных яйцах при приготовлении их жарением (яичницы, омлеты, скрэмблы).

Таким образом, СиАй-компонент крайне эффективен для обогащения рациона кур-несушек: он устраняет йододефицит у самой птицы, накапливается в яйце и впоследствии обогащает рацион потребителя, поскольку МИТ и ДИТ сохраняют высокую стабильность при термической обработке продукта.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / REFERENCES


1. Платонова, Н. М. (2015). Йодный дефицит: современное состояние проблемы. *Клиническая и экспериментальная тиреоидология*, 11(1), 12–21. [Platonova, N. M. (2015). Iodine deficiency: Current status. *Clinical and Experimental Thyroidology,* 11(1), 12–21. (In Russian)] https://doi.org/10.14341/ket2015112-21
2. Bost, M., Martin, A., Orgiazzi, J. (2014). Iodine deficiency: Epidemiology and nutritional prevention. *Trace Elements in Medicine,* 15(4), 3–7.
3. Flachowsky, G. (2007). Iodine in animal nutrition and iodine transfer from feed into food of animal origin. *Lohmann Information*, 42(2), 47–59.
4. Спиридонов, А. А., Мурашова, Е. В. (2010). Обогащение йодом продукции животноводства. Нормы и технологии. Санкт-Петербург: Береста, 2010. [Spiridonov, A. A., Murashova, E. V. (2010). Enrichment of products of animal husbandry with iodine. Norms and technologies. St. Petersburg: Beresta, 2010. (In Russian)]
5. Damaziak, K., Marzec, A., Riedel, J., Szeliga, J., Koczywąs, E., Cisneros, F. et al. (2018). Effect of dietary canthaxanthin and iodine on the production performance and egg quality of laying hens. *Poultry Science*, 97(11), 4008–4009. https://doi.org/10.3382/ps/pey264
6. EFSA (2013). Scientific opinion on the safety and efficacy of iodine compounds (E2) as feed additives for all animal species: Calcium iodate anhydrous and potassium iodide, based on a dossier submitted by Ajay Europe SARL. *EFSA Journal,* 11(2), 3099–3133. https://doi.org/10.2903/j.efsa.2013.3099
7. Созинов, В. А., Ермолина, С. А. (2014). Применение биогенных соединений йода в яичном птицеводстве. *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*, 1(38), 48–51. [Sozinov, B., Ermolina, C. (2014). The use of biogenic iodine compounds in the egg poultry farming. *Agricultural Science Euro-North-East*, 1(38), 48–51. (In Russian)]
8. Opalinski, S., Dolinska, B., Korczynski, M., Chojnacka, K., Dobrzanski, Z., Ryszka, F. (2012). Effect of iodine-enriched yeast supplementation of diet on performance of laying hens, egg traits, and egg iodine content. *Poultry Science*, 91(7), 1627–1632. https://doi.org/10.3382/ps.2011-02031
9. Yamamura, J.-i, Adachi, T., Aoki, N., Nakajima, H., Nakamura, R., Matsuda, T. (1995). Precursor-product relationship between chicken vitellogenin and the yolk proteins: The 40 kDa yolk plasma glycoprotein is derived from the C-terminal cysteine-rich domain of vitellogenin II. *Biochimica et Biophysica Acta — General Subjects*, 1244(2–3), 384–394. https://doi.org/10.1016/0304-4165(95)00033-8
10. Richards, M. P. (1997). Trace mineral metabolism in the avian embryo. *Poultry Science*, 76(1), 152–164. https://doi.org/10.1093/ps/76.1.152
11. Sumaiya, S., Nayak, S., Baghel, R. P. S., Nayak, A., Malapure, C. D., Kumar R. (2016). Effect of dietary iodine on production of iodine enriched eggs. *Veterinary World*, 9(6), 554–558. https://doi.org/10.14202/vetworld.2016.554-558
12. Daugeras-Bernard, N., Lachiver, F. (1980). Fonction thyroïdienne et métabolisme de l'iode chez l'embryon de Poulet *Reproduction Nutrition Development,* 20(1B), 203–207. [Daugeras-Bernard, N., Lachiver, F. (1980). Thyroid function and iodine metabolism in the chicken embryo. *Reproduction Nutrition Development*, 20(1B), 203–207. (In French)]
13. Wright, C., Leeson, H. (2018) Assessing iodine status in frontline healthcare. *Journal of Nutrition Medicine and Diet Care,* 4, Article 028. https://doi.org/10.23937/2572-3278.1510028
14. Sarlak, S., Tabeidian, S. A., Toghyani, M., Shahraki, A. D. F., Goli, M., Habibian, M. (2025). Organic iron and iodine in laying hen diet: Performance, egg quality, thyroid hormones, antioxidant status, serum and yolk lipids, and egg iron and iodine contents. *Journal of Trace Elements and Minerals*, 11, Article 100211. https://doi.org/10.1016/j.jtemin.2025.100211
15. Kulikovskii, A. V., Lisitsyn, A. B, Chernukha, I. M., Gorlov, I. F., Savchuk, S. A. (2016). Determination of iodotyrosines in food. *Journal of Analytical Chemistry*, 71(12), 1215–1219. https://doi.org/10.1134/S1061934816100087
16. Bakhshalinejad, R., Hassanabadi, A., Nassiri-Moghaddam, H., Zarghi, H. (2018). The effects of dietary calcium iodate on productive performance, egg quality and iodine accumulation in eggs of laying hens. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition*, 102(3), 746–754. https://doi.org/10.1111/jpn.12873
17. Słupczyńska, M., Jamroz, D., Orda, J., Wiliczkiewicz, A. (2014). Effect of various sources and levels of iodine, as well as the kind of diet, on the performance of young laying hens, iodine accumulation in eggs, egg characteristics, and morphotic and biochemical indices in blood. *Poultry Science*, 93(10), 2536–2547. https://doi.org/10.3382/ps.2014-03959
18. Yalcin, S., Kahraman, Z., Yalcin, S., Yalcin, S. S., Dedeoflu, H. E. (2004). Effects of supplementary iodine on the performance and egg traits of laying hens. *Bristish Poultry Science*, 45(4), 499–503. https://doi.org/10.1080/00071660412331286208
19. Kaufmann, S., Wolfram, G., Delange, F., Rambeck, W. A. (1998). Iodine supplementation of laying hen feed: A supplementary measure to eliminate iodine deficiency in humans? *Zeitschrift für Ernährungswissenschaft*, 37, 288–293. https://doi.org/10.1007/PL00007378
20. Rizzi, C. (2020). Laying hen biodiversity: A study on the effect of age on the yield performance and quality of eggs produced by two Italian purebred hens. *Acta Fytotechnica et Zootechnica,* 23, 299–307. https://doi.org/10.15414/afz.2020.23.mi-fpap.296-304
21. Кавтарашвили, А. Ш., Стефанова, И. Л., Свиткин, В. С., Новоторов, Е. Н. (2017). Производство функциональных яиц. сообщение II. Роль селена, цинка и йода. *Сельскохозяйственная биология*, 52(4), 700–715. [Kavtarashvili, A. Sh., Stefanova, I. L., Svitkin, V. S., Novotorov, E. N. (2017). Functional egg production. II. The roles of selenium, zinc, and iodine. *Agricultural Biology,* 52(4), 700–715. (In Russian)] https://doi.org/10.15389/agrobiology.2017.4.700rus
22. Saki, A. A., Aslani Farisar, M., Aliarabi, H., Zamain, P., Abbasinezhad, M. (2012). Iodine-enriched egg production in response to dietary iodine in laying hens. *Journal of Agricultural Technology*, 8(4), 1255–1267.
23. Abdel-Malak, N. Y., Osman, S. M. H., Bahakaim, A. S. A., Omar A. S., Ramadan, N. A. (2012). Effect of using different levels of iodine in layer's diets on egg iodine enrichment. *Egyptian Poultry Science*, 32(4), 851–864.
24. Lichovnikova, M., Zeman, L., Cermakova, M. (2003). The long-term effects of using a higher amount of iodine supplement on the efficiency of laying hens. *British Poultry Science*, 44(5), 732–734. https://doi.org/10.1080/00071660310001643741
25. Chen, D., Liu, Y., Xu, S. (2023). Supplemental methionine selenium effects on egg yolk physicochemical, functional, and protein structure during storage. *Frontiers in Nutrition*, 10, Article 1207754. https://doi.org/10.3389/fnut.2023.1207754
26. Кавтарашвили, А. Ш. (2024). Факторы, влияющие на внешние и внутренние показатели качества куриных яиц. Сообщение III. Факторы, влияющие на качество желтка (обзор). *Птицеводство*, 73(10), 61–68. [Kavtarashvili, A. Sh. (2024). Factors affecting internal and external parameters of egg quality in chicken. III. Factors affecting quality of egg yolk (A review). *Ptitsevodstvo,* 73(10), 61–68. (In Russian)] https://doi.org/10.33845/0033-3239-2024-73-10-61-68



| СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ | AUTHOR INFORMATION |
|---|---|
| **Принадлежность к организации** | **Affiliation** |
| **Лукин Дмитрий Евгеньевич** — аспирант, Федеральный научный центр пищевых систем им. В. М. Горбатова<br>109316, Москва, ул. Талалихина, 26<br>E-mail: caja@mail.ru<br>ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3253-6745 | **Dmitry E. Lukin**, Graduate Student, V. M. Gorbatov Federal Research Center for Food Systems<br>26, Talalikhin str., 109316, Moscow, Russia<br>E-mail: caja@mail.ru<br>ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3253-6745 |
| Вострикова Наталья Леонидовна — доктор технических наук, Руководитель Научно-исследовательского испытательного центра. Федеральный научный центр пищевых систем им. В. М. Горбатова<br>109316, Москва, ул. Талалихина, 26<br>E-mail: n.vostrikova@fncps.ru<br>ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9395-705X | **Natalia L. Vostrikova**, Doctor of Technical Sciences, Head of the Research Testing Center, V. M. Gorbatov Federal Research Center for Food Systems<br>26, Talalikhin str., 109316, Moscow, Russia.<br>E-mail: n.vostrikova@fncps.ru<br>ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9395-705X |
| **Большакова Лариса Сергеевна** — кандидат биологических наук, декан, факультет «Технологии, товароведение и сервис», Среднерусский институт управления — филиал Российской академии народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации<br>302028, Орел, ул. Октябрьская, 12<br>E-mail: ogietitf@yandex.ru<br>ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4074-4461 | **Larisa S. Bolshakova**, Candidate of Biological Sciences, Dean, Faculty of Technology, Commodity Science and Service, Central Russian Institute of Management — branch Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration<br>12, Oktyabrskaya str., 302028, Orel, Russia<br>E-mail: ogietitf@yandex.ru<br>ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4074-4461 |
| **Куликовский Андрей Владимирович** — кандидат технических наук, заведующий лабораторией «Научно-методические работы, биологические и аналитические исследования», Федеральный научный центр пищевых систем им. В. М. Горбатова<br>109316, Москва, ул. Талалихина, 26<br>E-mail: a.kulikovskii@fncps.ru<br>ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9140-5390 | **Andrey V. Kulikovskii**, Candidate of Technical Sciences, Head of Laboratory of Scientific and Methodical Work, Biological and Analytical Research, V. M. Gorbatov Federal Research Center for Food Systems<br>26, Talalikhin str., 109316, Moscow, Russia<br>E-mail: a.kulikovskii@fncps.ru<br>ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9140-5390 |

| СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ | AUTHOR INFORMATION |
|---|---|
| **Принадлежность к организации** | **Affiliation** |
| **Утьянов Дмитрий Александрович** — кандидат технических наук, научный сотрудник, лаборатория «Научно-методические работы, биологические и аналитические исследования», Федеральный научный центр пищевых систем им. В. М. Горбатова<br>109316, Москва, ул. Талалихина, 26<br>E-mail: d.utyanov@fncps.ru<br>ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7693-3032<br>* автор для контактов | **Dmitry A. Utyanov** — scientific worker, Laboratory of scientifically-methodical works and control-analytical researches, V. M. Gorbatov Federal Research Center for Food Systems<br>26, Talalikhin str., 109316, Moscow, Russia<br>E-mail: d.utyanov@fncps.ru<br>ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7693-3032<br>* corresponding author |
| **Захарова Варвара Алексеевна** — младший научный сотрудник, лаборатория «Научно-методические работы, биологические и аналитические исследования», Федеральный научный центр пищевых систем им. В. М. Горбатова<br>109316, Москва, ул. Талалихина, 26<br>E-mail: v.zakharova@fncps.ru<br>ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1862-7410 | **Varvara A. Zakharova**, Junior Researcher, Laboratory of Scientifically-Methodical Works and Control-Analytical Researches, V. M. Gorbatov Federal Research Center for Food Systems<br>26, Talalikhin str., 109316, Moscow, Russia<br>E-mail: v.zakharova@fncps.ru<br>ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1862-7410 |
| **Критерии авторства** | **Contribution** |
| Авторы в равных долях имеют отношение к написанию рукописи и одинаково несут ответственность за плагиат. | The author has the sole responsibility for writing the manuscript and is 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/10.21323/2618-9771-2025-8-3-393-400

Поступила 03.06.2025
Поступила после рецензирования 15.09.2025
Принята в печать 18.09.2025
© Хворова Л. С., Андреев Н. Р., Бызов В. А., 2025

https://www.fsjour.com/jour
Обзорная статья
Open access

# ГЛЮКОЗА: ОСНОВНЫЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ИХ ПРАКТИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ

Хворова Л. С., Андреев Н. Р.*, Бызов В. А.

Всероссийский научно-исследовательский институт крахмала и переработки крахмалсодержащего сырья — филиал Федерального исследовательского центра картофеля имени А. Г. Лорха, Красково, Московская область, Россия

*КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:*
*виды глюкозы, метаболизм, мутаротация, растворимость, кристаллизация, сладость, гигроскопичность, стабильность*

АННОТАЦИЯ

Глюкоза является одним из важнейших лекарственных средств и продуктов питания стратегического назначения. Рынок глюкозы является высококонкурентным на мировом уровне и активно развивающимся. По прогнозу Business research company, в период с 2025 по 2034 г объем рынка глюкозы будет стремительно расти с $6,81 до $9,2 млрд. Рост рынка глюкозы объясняется растущим спросом на производство кондитерских изделий, функциональных продуктов питания и напитков, кормов для животных, фармацевтических препаратов, биотоплива. За последнее десятилетие накоплены данные о физико-химических свойствах глюкозы, их роли в углеводном обмене человека, а также в разработке новых пищевых продуктов и медицинских препаратов. Цель данного обзора — проанализировать актуальные исследования, посвященные рынку глюкозы, многофункциональности ее свойств и сферам применения. Заслуживает внимания глюкостатическая теория ожирения, а также выявленная ранее неизвестная способность нейронов головного мозга к самостоятельному гликолизу. Открыт рецептор сладкого вкуса и изучен механизм его влияния на избыточное потребление пищи и здоровье человека. Особенно вредное воздействие при этом оказывают фруктоза и искусственные подсластители. Большое внимание исследователей направлено на повышение стабильности глюкозы. При анализе рынка глюкозы и ее физико-химических свойств выявлено актуальное направление развития производства, связанное с расширением сфер ее применения. Оно включает получение новых кристаллических форм, расширение производства ангидридной глюкозы, внедрение технологий распылительной сушки и лиофилизации, а также создание продуктов со-кристаллизации глюкозы с другими веществами для пищевой, фармацевтической, медицинской и ветеринарной отраслей.

Received 03.06.2024
Accepted in revised 15.09.2025
Accepted for publication 18.09.2025
© Khvorova L. S., Andreev N. R., Bysov V. A., 2025

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

# GLUCOSE: BASIC PHYSICO-CHEMICAL PROPERTIES AND THEIR PRACTICAL SIGNIFICANCE

Ludmila S. Khvorova, Nikolay R. Andreev*, Vasily A. Byzov

All-Russian Research Institute of Starch and Starch — containing Raw Materials Processing — Branch of Russian Potato Research Centre, Kraskovo, Moscow region, Russia

*KEY WORDS:*
*types of glucose, metabolism, mutarotation, solubility, crystallization, sweetness, hygroscopicity, stability*

ABSTRACT

Glucose is one of the most important medicines and strategic food products. The glucose market is highly competitive on a global level and is actively developing. According to the forecast of the Business research company, in the period from 2025 to 2034, the glucose market volume will grow rapidly from $6.81 to $9.2 billion. The growth of the glucose market is explained by the growing demand for the production of confectionery, functional food and beverages, animal feed, pharmaceuticals, and biofuel. Over the past decade, data have been accumulated regarding the physico-chemical properties of glucose, their role in human carbohydrate metabolism and the creation of new foods and medicines. The purpose of this review was to analyze current research reflecting the market, versatility of properties and uses of glucose. The glucostatic theory of obesity deserves attention, as well as the previously unknown ability of brain neurons to glycolysis. A sweetness receptor has been discovered and the mechanism of its influence on excessive food intake and human health has been investigated. Fructose and artificial sweeteners have a particularly harmful effect. Much of the researchers' attention is focused on increasing glucose stability. The analysis of the glucose market and its physico-chemical properties revealed the current direction of the development of glucose production linked with the expansion of the fields of its use. It includes obtaining new crystalline forms, expanding the production of anhydrous glucose, introducing spray drying and lyophilization technologies, creating products of the co-crystallization of glucose with other substances for the food, pharmaceutical, healthcare, veterinary and other industries.

## 1. Введение

Кристаллическая глюкоза является одним из важнейших лекарственных средств и продуктов питания стратегического назначения. Здравоохранение населения ни в одной стране мира не может обходиться без глюкозы. Глюкозу пищевую и фармакопейную вырабатывают из крахмала на предприятиях крахмалопаточной промышленности.

С физиологической и питательной точек зрения это вещество имеет преимущества перед другими углеводами: глюкоза снабжает все органы и ткани необходимой биологической энергией. Другие пищевые углеводы — крахмал, олигосахариды и моносахариды — действуют лишь после их превращения в глюкозу. Глюкозу широко применяют в медицинской практике как лекарственный препарат, при больших потерях крови, сердечной слабости и других заболеваниях. Она входит в состав кровезаменяющих и противошоковых жидкостей и других препаратов. В список основных лекарственных средств Всемирной организации здравоохранения, который включает самые безопасные и эффективные лекарства, необходимые в системе здравоохранения, входит глюкоза, глюкоза с хлоридом натрия в виде раствора для внутривенного введения [1]. Кристаллическая

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: **Хворова, Л. С., Андреев, Н. Р., Бызов, В. А.** (2025). Глюкоза: основные физико-химические свойства и их практическая значимость. *Пищевые системы*, 8(3), 393–400. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-3-393-400

FOR CITATION: **Khvorova, L. S., Andreev, N. R., Bysov, V. A.** (2025). Glucose: Basic physico-chemical properties and their practical significance. *Food Systems*, 8(3), 393–400. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-3-393-400

глюкоза используется как наполнитель при изготовлении многих таблетированных лекарственных средств, является исходным сырьем для получения сорбита и аскорбиновой кислоты, а также для приготовления многих ветпрепаратов [2]. В пищевой промышленности при производстве мороженого, фруктовых консервов, конфет, безалкогольных напитков глюкоза отличается от сахарозы иным, приятным, менее сладким вкусом с ощущением прохлады и с более сильным бактериостатическим эффектом (при одинаковых концентрациях). Глюкоза также используется в кондитерских и консервных изделиях, чтобы подчеркнуть их (фруктовый) вкус, придать легкий охлаждающий эффект и сбалансировать их сладость. Глюкоза очень полезна в мороженом, леденцах, водяном льду и других замороженных десертах, где требуется умеренная сладость. Благодаря снижению температуры замерзания мороженого с глюкозой улучшаются его вкусовые качества и тающие свойства, позволяющие брать мороженое ложкой при температуре минус 18 °C. В спортивной медицине глюкозу используют в виде энергетического средства при дополнительном питании спортсменов [3].

Рынок глюкозы является высококонкурентным на мировом уровне и активно развивающимся [4]. По прогнозу Business Research Company [4], в ближайшие несколько лет объем рынка всех видов глюкозы будет стремительно расти. К 2034 году объем рынка вырастет с $6,81 до $9,2 млрд. Рост объемов производства глюкозы в натуральном выражении с 2025 по 2034 год составит от 14,2 млн т до 25 млн т со среднегодовым приростом 4,9 %. Рост рынка глюкозы в прогнозируемом периоде можно объяснить растущим спросом в кондитерской промышленности, в сферах функциональных продуктов питания и напитков, кормов для животных, фармацевтических препаратов, производства биотоплива. По данным другой компании [5], ожидается, что к 2030 году объем мирового рынка только гидратной глюкозы достигнет $5598,2 млн при среднегодовом темпе роста 3,4 %. Гидратная и ангидридная глюкоза на рынке находятся в долевом соотношении 65:35. Наиболее быстрорастущим сегментом рынка является ангидридная глюкоза из-за возрастания потребности в ней в производстве фармацевтических препаратов. Использование глюкозы в секторе продуктов питания и напитков занимало самую большую долю рынка, более 40 % от общего дохода, за которым следуют фармацевтические препараты и косметика. Ожидается, что фармацевтический сектор будет расти самым быстрым темпом в течение прогнозируемого периода с растущей потребностью в использовании глюкозы в новых лекарственных препаратах и энергетических добавках.

Анализ объема и динамики российского рынка глюкозы представлен по данным компании Discovery Research Group за 2020 год [6]. Согласно расчетам компании, объем рынка в 2020 году составил 42295,6 т. Большую долю рынка глюкозы в натуральном выражении 46,6 % занял производитель АО «БиоТех Росва». Темп прироста — 8 %. Объем в денежном выражении составил $18301,0 тыс. Объем импорта глюкозы составил $13905,0 тыс. В стоимостном выражении значительный объем импорта с долей 25,1 % занимает Roquette Freres. Лидером импорта глюкозы в стоимостном выражении является Китай — 52,8 %. Объем экспорта глюкозы из России составил 1195,4 т. Наибольший объем был экспортирован в Беларусь — 73,5 %, большая часть экспорта глюкозы в страны Таможенного союза ЕАЭС принадлежит компании АО «БиоТех Росва».

Целью статьи является обзор научной информации в области исследований физико-химических свойств глюкозы и их практического использования.

## 2. Объекты и методы

Проанализированы научные исследования о структуре молекулы глюкозы, о ее физико-химических свойствах и роли в углеводном обмене, а также в разработке новых кристаллических форм для применения в пищевой и медицинской продукции. Поиск данных осуществлялся в научных электронных библиотеках и поисковых системах: eLIBRARY.RU, Science Direct, БД Scopus, в медицинской базе данных PubMed, на портале ResearchGate. Поисковые запросы выполняли по следующим ключевым словам на русском, английском и других языках: теоретические вопросы, виды глюкозы, физико-химические свойства, метаболизм, мутаротация, растворимость, сладость, гигроскопичность, стабильность, сферы использования: медицина, пищевая промышленность, спортивное питание.

## 3. Виды глюкозы

Глюкозу кристаллическую в промышленном масштабе вырабатывают в трех видах: гидратной α-d-глюкозы, ангидридной α-d-глюкозы и ангидридной β-d-глюкозы, отличающихся формой кристаллов, растворимостью, температурой кристаллизации и другими свойствами. Гидратная α- глюкоза кристаллизуется при температуре ниже 50 °C, ангидридная α-глюкоза кристаллизуется при температуре выше 50 °C, ангидридная β-глюкоза образует кристаллы при температуре выше 100 °C.

## 4. Основные физико-химические свойства глюкозы

### *4.1. Метаболизм глюкозы*

Глюкоза — это основной углеводный источник энергии для позвоночных. Содержание сахара в крови от 80 до 100 мг на 100 мл крови человека является решающим фактором в снабжении всех клеток необходимой энергией и поддерживается в организме за счет приема пищи. Избыток глюкозы в виде гликогена откладывается в печени и мышцах (около 500 г) и расходуется организмом по мере необходимости, расщепляясь на глюкозу посредством гликогенолиза. Кроме того, при недостаточности глюкозы организм может продуцировать глюкозу из глюконеогенных аминокислот лактата, глицерина и пирувата в результате глюконеогенолиза. Мозгу требуется 140 г глюкозы в день. В рационе человека углеводы должны составлять от 45 % до 65 % от общего количества потребляемых калорий [1,7]. Глюкоза содержится во фруктах и овощах, вместе с фруктозой и сахарозой отвечая за их сладкий вкус.

В живых организмах глюкоза превращается в несколько других соединений, которые являются исходными продуктами для различных метаболических путей. Вопросу метаболизма глюкозы во всем мире уделяется большое внимание, т. к. растет количество людей с ожирением, с заболеваниями сердечно-сосудистой системы, с диабетом. Представляет интерес глюкостатическая теория, начало которой положил Жан Майер, обнаружив, что увеличение концентрации глюкозы в крови приводит к усилению чувства сытости, тогда как ее падение имеет противоположный эффект. Исследования, посвященные развитию теории глюкостаза [8] показали, что факторы, способствующие гипогликемии и/или нестабильности глюкозы, могут вызывать избыточное потребление энергии, избыточный вес и нарушение толерантности к глюкозе. При этом наибольший вред для организма, приводящий к избыточному весу, наносят сильные колебания глюкозы в крови, происходящие в результате длительных перерывов между приемами пищи.

Чрезмерное или несбалансированное потребление углеводов связывают с риском развития диабета. Исследования с использованием математического моделирования [9] показали, что на уровень глюкозы в плазме крови натощак наибольшее влияние оказывает диета (60 %), тогда как физическая активность — ходьба 16 тыс. шагов (11 км) — обеспечивает лишь 40 % снижения этого показателя.

В области аппаратурного мониторинга глюкозы в организме предложено оригинальное решение, позволяющее одновременно удалять избыток глюкозы и преобразовывать его в энергию для питания прибора [10]. Для этого с использованием медьсодержащего композита из 3D-углеродных нанотрубок разработан имплантируемый метаболический топливный элемент, использующий глюкозу крови в качестве источника энергии. Прибор непрерывно контролирует уровень глюкозы в крови, преобразует избыток глюкозы в электроэнергию во время гипергликемии и вырабатывает достаточно энергии (0,7 мВт $см^{-2}$, 0,9 В) для опто- и электрогенетической регуляции выделения инсулина из сконструированных бета-клеток. Способ в эксперименте позволяет восстанавливать гомеостаз глюкозы в крови автоматическим, самодостаточным и замкнутым способом.

Новые данные получены при сравнении влияния на печень трех углеводов: сахарозы, фруктозы, глюкозы [11]. Регулярное употребление как фруктозо-, так и сахарозо-подслащенных напитков в умеренных дозах (с одинаковой калорийностью) увеличивает синтез жирных кислот в печени даже в базальном состоянии; такой эффект не наблюдается после потребления глюкозы. Эти результаты свидетельствуют об адаптивном ответе на регулярное воздействие фруктозы в печени.

Долгое время между учеными продолжались дискуссии о метаболизме глюкозы в мозге. Многие предполагали, что большую часть глюкозы потребляют глиальные клетки, которые затем метаболическим продуктом глюкозы (лактатом) питают нейроны [12]. Новые данные о механизме потребления глюкозы человеческим мозгом, представленные в статье ученых Института Гладстона и Калифорнийского университета [13], свидетельствуют о том, что нейроны сами способны метаболизировать глюкозу посредством гликолиза для нормального функционирования мозга, в том числе при выполнении процессов обучения и запоминания. Было также показано, что в случаях заболеваний мозга, связанных с невозможностью получать энергию посредством гликолиза, нейроны в качестве

источника энергии используют галактозу. Однако получаемая от нее энергия не может полностью компенсировать потерю метаболизма глюкозы. Представленные в статье результаты могут способствовать разработке новых подходов к лечению нейродегенеративных заболеваний на ранних стадиях, таких как болезнь Альцгеймера и Паркинсона (сопровождающихся снижением поглощения глюкозы мозгом), а также к более глубокому пониманию проблем сохранения здоровья мозга по мере старения человека.

*4.2. Мутаротация*

Мутаротация является важнейшим свойством глюкозы. Величина ее показателя «удельное вращение», равная +52,5°, служит основным параметром идентификации глюкозы. Две кристаллические формы: α-D-глюкоза и β-D-глюкоза имеют разную начальную оптическую активность в растворе, измеряемую величиной удельного вращения +112° у α -D-глюкозы и +18° у β-D-глюкозы. При растворении любой из них сразу включается реакция таутомерии (взаимного превращения α-D-глюкозы в β-D-глюкозу и наоборот), проявляющаяся мутаротацией — изменением угла вращения плоскости поляризации от начального до равновесного +52,5°, что для наглядности изображено на Рисунке 1 [14].

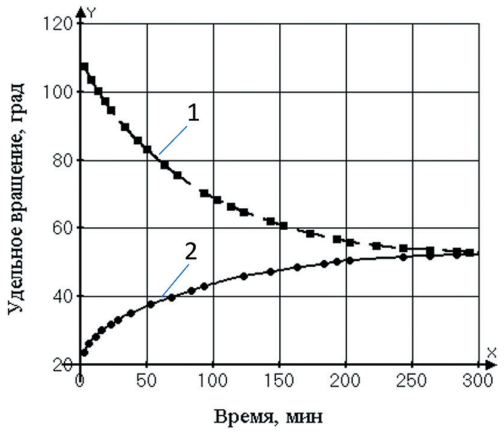



Рисунок 1. **Мутаротация α- и β-глюкозы с течением времени от момента растворения: 1-α-глюкоза, 2 — β-глюкоза**

Figure 1. **Mutarotation of α- and β-glucose over time from the moment of dissolution: 1-α-glucose, 2 — β- glucose**

При достижении постоянного значения удельного вращения +52,5° в растворе устанавливается состояние равновесия, соответствующее содержанию 36 % α-глюкозы и 64 % β-глюкозы. Смесь состоит из 36 % альфа-D-глюкозы, 64 % бета-D-глюкозы и 0,02 % глюкозы с открытой цепью.

Скорость мутаротации зависит от температуры и при комнатной температуре (до достижения равновесного состояния таутомеров) продолжается от 20 мин до 15–20 ч.

Явление мутаротации открыто в 1844 году и с тех пор по мере расширения знаний о строении молекулы глюкозы схематическое изображение механизма мутаротации глюкозы приобрело ряд видоизменений.

В кристаллах все моносахариды (пентозы, гексозы, гептозы и т. д.) существуют только в циклических, главным образом пиранозных, структурах. Одна из схем механизма мутаротации представлена на Рисунке 2 [15].

При добавлении циклической молекулы глюкозы к воде происходит обратимая таутомеризация одной формы глюкозы в другую через линейную (альдегидную) форму с открытой цепью. Взаимопревращение пиранозной формы глюкозы в альдегидную включает три стадии: протонирование O5, разрыв связи O1-H (внутримолекулярный перенос), разрыв связи O5-C1. Открытая цепь может снова замкнуться, образуя α- или β-глюкозу. Раскрытие, таутомеризация, сдвиг гидроксила на C1 и повторное закрытие обеспечивают взаимопревращение между α- и β-формами до достижения равновесия. Кислотные или щелочные условия облегчают стадию раскрытия кольца. Специфический кислотно-щелочной катализ ускоряет мутаротацию, катализируя образование разомкнутой цепи. Повышение температуры, низкий уровень pH, полярные растворители типа воды ускоряют мутаротацию.

Мутаротация глюкозы играет важную роль в биологии, оказывая влияние на физические и химические свойства сахаров, такие как растворимость, сладость и реактивность. Мутаротация участвует в метаболизме углеводов. Изомеразы катализируют мутаротацию для быстрого достижения равновесия, что обеспечивает участие необходимого аномера в последующих ферментативных реакциях. Мутаротация производит циклические конформации, необходимые для переноса через мембраны, что облегчает чередование циклических и открытых переходов во время гликолиза. В целом, мутаротация позволяет аномерным формам изменять баланс с течением времени, что важно для сложного химического состава углеводов в живых организмах.

Мутаротация находит практическое применение при контроле качества, сладости и срока годности в пищевой промышленности. Изменение величины оптического вращения используется для определения фальсификации меда. Мониторинг мутаротации позволяет выявить изменения в процессе созревания плодов, которое важно для оптимизации условий промышленного брожения. Мутаротация используется в контроле производства глюкозно-фруктозного сиропа.

В вопросе реакции мутаротации до сих пор нет однозначного решения по механизму переноса протона между кислородом альдегида и соседней гидроксильной группой. В статьях [16,17] рассматривают два варианта: внутримолекулярный перенос протона и перенос протона с участием одной или более молекул воды. В работе [16] оба механизма изучались в газовой среде и в водном растворе с использованием специальной модели поляризуемого континуума. Установлено, что значения коэффициентов скорости лучше всего согласуются с механизмом переноса протона с участием воды. При изучении зависимости между α- и β-глюкозой во времени с помощью ближней инфракрасной спектроскопии [17] показано, что в механизме мутаротации участвуют более одной молекулы воды.

Мутаротация играет важную роль в процессе кристаллизации, так как при ее участии решаются два вопроса. Во-первых, при кристаллизации любого из аномеров второй выступает примесью для кристаллизуемого аномера и тормозит его скорость кристаллизации. Во-вторых, вследствие кристаллизации глюкозы в условиях равновесного состояния аномеров происходит постоянное нарушение равновесия и его восстановление. Время, затрачиваемое на восстановление равновесного состояния, снижает общую скорость кристаллизации кристаллизуемого аномера [18,19]. В процессе кристаллизации глюкозы замедляющее действие мутаротации начинает сказываться при содержании кристаллов в утфеле свыше 10 масс. %. Влияние мутаротации усиливается с увеличением пересыщения, с возрастанием содержания кристаллов в утфеле и с понижением температуры. Авторы исследований влияния концентрации раствора на константу скорости мутаротации глюкозы высказали предположение [20], что прочная структура воды вокруг β-D-глюкозы препятствует её дегидратации при кристаллизации и, следовательно, медленную скорость роста кристаллов моногидрата α-D-глюкозы можно объяснить преобладанием сильно гидратированных гидроксильных группы β -D-глюкозы в растворе.

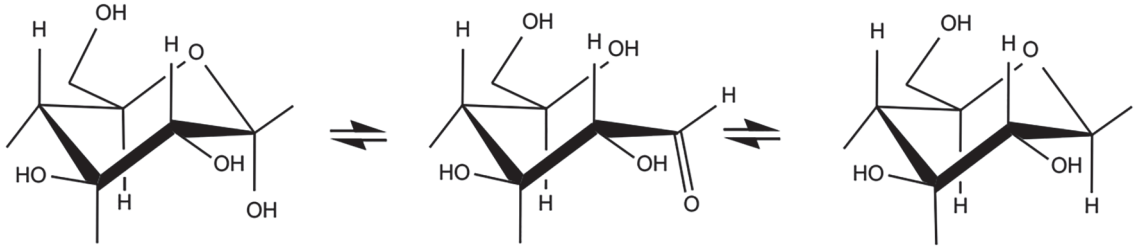



Рисунок 2. **Механизм мутаротации молекул глюкозы**

Figure 2. **Mechanism of mutarotation of glucose molecules**

При поиске ускорителей мутаротации глюкозы найдены реагенты в виде хлоридов: глюкозы [21] и ксилозы [22]. Показано, что $SnCl_4$ способствует ускорению процесса мутаротации глюкозы с образованием β-аномера, в то время как $CrCl_3$ способствует образованию α-аномера. В исследованиях с ксилозой выявлено влияние NaCl на мутаротацию в виде продления времени равновесия между α- и β-аномерами. Доля α-ксилопиранозы была немного выше в растворе NaCl-$H_2O$, чем в $H_2O$, и влияние NaCl на α- и β-ксилопиранозу было различным: NaCl был более благоприятен для стабилизации структуры α-ксилопиранозы. Результаты могут быть ценной информацией для эффективного использования гемицеллюлозы.

Влияние высокочастотного электромагнитного поля диапазона 30–200 МГц на замедление мутаротации глюкозы показано в испытаниях [23]. Значение равновесного удельного вращения в растворе глюкозы не меняется, в то время как у фруктозы смещается в сторону отрицательных величин. Полученные результаты авторы объясняют структурной перестройкой растворителя — воды под действием электромагнитного поля.

*4.3. Растворимость*

Растворимость — одна из важнейших индивидуальных характеристик веществ и продуктов. На Рисунке 3 представлена растворимость трех кристаллических видов глюкозы при температуре 20 °C. Из Рисунка 3 следует, что самой низкой растворимостью обладает гидратная α-глюкоза, а самой высокой — ангидридная β-глюкоза [24]. Ангидридная глюкоза быстрее растворяется и ее насыщенные растворы имеют более высокую концентрацию сухих веществ.

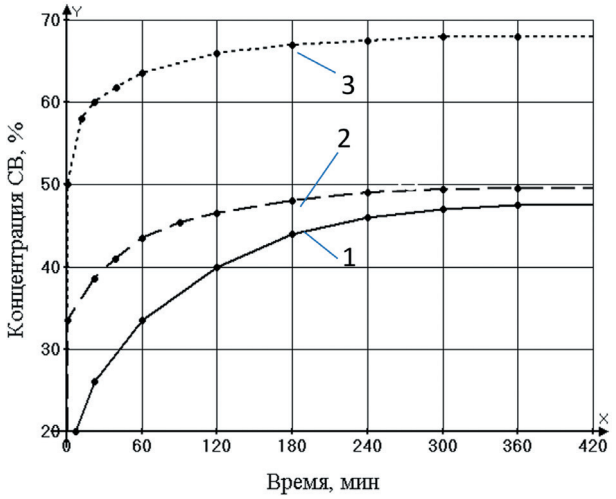



Рисунок 3. **Растворимость глюкозы с течением времени: 1 — гидратная глюкоза, 2 — ангидридная α–глюкоза, 3 — ангидридная β–глюкоза**

Figure 3. **Solubility of glucose over time: 1 — hydrated glucose, 2 — anhydrous α–glucose, 3 — anhydrous β– glucose**

На основании исследований [25] свойств водородных связей между молекулами сахаров и воды выявлена природа высокой растворимости β-глюкозы. Установлено, что β-глюкоза образует наибольшее количество гидрофильных водородных связей с молекулами воды, а α-глюкоза — одно из наименьших; β-глюкоза также имеет наименьшее число гидрофобно связанных молекул воды. Средняя длина водородной связи с группой $OH^-$ была самой короткой/длинной для β-глюкозы/α-глюкозы соответственно. Эти результаты согласуются с фактом, что β-глюкоза наиболее, а α-глюкоза наименее растворима в воде.

*4.4. Кристаллизация*

Глюкоза способна образовывать кристаллы, хотя в природе распространена в растворенном виде. Процесс ее кристаллизации сложный, длительный и для каждого вида (гидратной и ангидридной α-глюкозы и ангидридной β-глюкозы) имеет индивидуальный технологический режим и форму кристаллов. Процесс кристаллизации является основным при получении глюкозы, как и для других кристаллических веществ, позволяет не только получать продукт в кристаллическом виде, но и способствует очистке его от примесей, оставляя их в маточном растворе. Глюкозу гидратную получают в политермических условиях при снижении температуры с 45–50 °C до 25 °C в течение 30–70 ч в зависимости от глюкозного эквивалента (ГЭ) раствора. При этом требуется большое количество затравочных кристаллов, 10–15 % по массе сиропа. Для ангидридной α-глюкозы разработаны два технологических режима при температуре выше 50 °C: изотермический и политермический. Наиболее совершенный изотермический режим кристаллизации практически не требует затравки и продолжается 7 ч [26].

Управление режимом снижения температуры при кристаллизации гидратной глюкозы является сложным и трудоемким. Для его совершенствования разрабатываются многочисленные модели. Модель [27] без затравочной кристаллизации гидратной глюкозы учитывает сложные явления: дисперсию скорости роста кристаллов и эффект реакции мутаротации. Модель способна предсказывать содержание кристаллов в утфеле как функцию размера частиц и времени, а также баланс глюкозы в маточном растворе и кристаллической форме в каждой точке модели. Важным отличием модели кристаллизации от известных является учет конкурентного вклада реакции мутаротации в кинетику кристаллизации, который позволяет более точно предсказывать значение реакции мутаротации для роста кристаллов.

Большинство активных компонентов лекарств имеют проблемы с растворимостью, биодоступностью, химической стабильностью и влагопоглощением [28]. Разработка лекарственных препаратов с превосходными физико-химическими характеристиками, такими как температура плавления, таблетируемость, растворимость, стабильность, биодоступность и проницаемость, при сохранении фармакологических свойств активного фармацевтического ингредиента значительно облегчается совместной кристаллизацией (со-кристаллизацией) лекарственных веществ. Все компоненты со-кристалла, представляющего собой кристаллическую гомогенную многокомпонентную систему, связанную нековалентными взаимодействиями, являются стабильно твердыми в условиях окружающей среды. Аналогичные проблемы наблюдаются и в пищевой промышленности.

Глюкоза обладает способностью к со-кристаллизации с галогенами и с некоторыми сахарами. В статье [29] представлен кристаллический глюкозный продукт, полученный со-кристаллизацией глюкозы с хлоридом натрия с единой кристаллической решеткой. Продукт легко и быстро кристаллизуется и обладает повышенной по сравнению с глюкозой растворимостью, имеет одинаковый химический состав с препаратом «Раствор глюкозы5 % + NaCl 0, 9 %» и идеально подходит для его получения с целью применения в фармацевтике, пищевой промышленности, ветеринарии. Не менее полезным является глюкозный продукт с хлоридом калия [30]. Со-кристаллизация глюкозы с сахарозой, фруктозой позволяет создавать новые более термостабильные продукты [31,32].

*4.5. Сладость*

Сладость является важнейшим свойством пищевых продуктов. Сладость — это сложный сенсорный опыт, включающий химические взаимодействия, биологические рецепторы и нейронную обработку. Восприятие сладости играет решающую роль в выборе продуктов питания и в диетических привычках [33]. Главным пищевым продуктом, обладающим сладким вкусом, является сахар, сахароза. Потребление сахара населением земного шара постоянно растет. В США наблюдается самый высокий уровень потребления сахара — в среднем 57 фунтов добавленного сахара в год, что составляет около 70 г в день, тогда как Американская кардиологическая ассоциация рекомендует не превышать 25 г в день для женщин и 38 г для мужчин [34].

Исследования показывают, что высокое потребление добавленного сахара создает многочисленные проблемы, включая повышенный риск дисбактериоза кишечника, снижение иммунной функции, рак и нейродегенерацию, а также увеличивают риск когнитивных нарушений, уменьшения объема мозга и снижения когнитивных способностей из-за развития резистентности мозга к инсулину. Женщины, употребляющие пищу с высоким гликемическим индексом и высокой гликемической нагрузкой страдают от бессоницы [35], имеют повышенный риск бесплодия [36], колоректального рака [37], хотя по вопросу связывания колоректального рака с употреблением пищи с высоким гликемическим индексом и высокой гликемической нагрузкой существуют противоречивые мнения, а именно: степень ожирения прямо пропорционально увеличивает риск прогрессирования колоректального рака и ухудшает прогноз заболевания, тогда как нарушения углеводного обмена не имеют прямой связи с прогрессированием колоректального рака [38].

Важным шагом в разработке новых стратегий для профилактики ожирения и связанных с ним заболеваний является открытие в 2001 году рецептора сладкого вкуса [39]. Рецептор сладкого вкуса — это белковые структуры T1R2 и T1R3, расположенные на вкусовых сосочках языка и работающие вместе, чтобы обнаруживать сладкие молекулы. Этот рецептор распознает все химически разнообраз-

ные соединения, воспринимаемые людьми как сладкие, включая натуральные сахара и искусственные подсластители. Когда сладкие вещества связываются с этими рецепторами, они запускают каскад химических сигналов. Этот процесс приводит к отправлению нервных импульсов в мозг, где и формируется восприятие сладкого вкуса. Важно отметить, что экспрессия функционального рецептора сладкого вкуса была зарегистрирована и в многочисленных внеротовых экстра-вкусовых тканях, где, как предполагается, он регулирует метаболические процессы [39]. Эта недавно признанная роль рецептора сладкого вкуса делает его потенциально новой терапевтической целью для лечения ожирения и связанных с ним метаболических дисфункций, таких как диабет и гиперлипидемия. Механизм формирования сладкого вкуса весьма сложный и до сих пор не до конца изучен.

Поиски причины высокого потребления сахара с проведением исследований на животных [40] показали значительное совпадение между потреблением добавленных сахаров и возникновением эффектов, схожих с наркотическими — перееда ние, тяга, толерантность, абстиненция, перекрестная сенсибилизация, перекрестная толерантность, перекрестная зависимость, а также эффекты вознаграждения и опиоидные реакции. Зависимость от сахара, по-видимому, является зависимостью от естественных эндогенных опиоидов, которые высвобождаются при приеме сахара. Литературные данные [40,41] демонстрируют значительные совпадения между наркотиками, вызывающими привыкание, и сахаром с точки зрения нейрохимии мозга и поведенческих проявлений животных и людей.

Ожирение — серьезная проблема, затрагивающая более 650 миллионов взрослых людей по всему миру. Потребление сахара смещает границу голода-сытости, способствуя перееданию при отсутствии потребности в энергии [41]. Потребление сладкой пищи запускает в мозге насекомых и млекопитающих выработку сигнала вознаграждения — дофамина. Этот нейромедиатор усиливает желание потреблять сахар, инициирует поведение предвкушения и поиска сладкой пищи, при этом снижая чувствительность мозга к сладким вкусам, что приводит к перееданию и увеличению веса. Установленное в результате исследований совпадение факторов риска, нейробиологических субстратов и поведенческих эффектов наркомании и переедания сахара позволяет предположить, что добавленный сахар является опасным веществом, которое может спровоцировать поведение, сходное с наркотической зависимостью [40,41].

Добавленная фруктоза особенно вредна, поскольку она не сразу становится доступным источником энергии для мозга, обеспечивая сладкий вкус без каких-либо побочных эффектов, сопутствующих полезному и своевременному приему питательных веществ. Если рассматривать глюкозу и фруктозу по отдельности, то оказывается, что добавление фруктозы связано с гораздо большим риском для здоровья, чем глюкозы. Фруктоза может увеличить потребность в еде и привести к образованию жира. В ответ на растущие доказательства вредного воздействия потребления сахаросодержащих напитков (ССН), связанных с детским ожирением и с риском ожирения, диабета и сердечно-сосудистых заболеваний у взрослых, в США введены «налоги на газировку», чтобы сократить потребление ССН.

Особые метаболические риски представляет высокофруктозный кукурузный сироп (ВФС) [42], используемый в ССН и в бесчисленном количестве других обработанных пищевых продуктов. Исследования показывают, что потребление безалкогольных напитков, подслащенных ВФС, усиливает голод, снижает сытость и изменяет вкус на более сладкий, формируя пищевые предпочтения. Избыточное потребление ВФС способствует развитию резистентности к инсулину, повышению уровня триглицеридов и накоплению висцерального жира, что является критическими признаками метаболического синдрома, увеличивая риск жировой болезни печени, развития астмы, поликистоза яичников у женщин.

Для борьбы с переизбытком сахара было приложено много усилий для поиска заменителей сахара, таких как искусственные некалорийные подсластители (ИНП) [43]. ИНП включают аспартам, ацесульфам-К, сукралозу, сахарин, цикламат, неогесперидин дигидрохалкон (неогесперидин DC), неотам, тауматин и адвантам. Большинство исследований показали, что потребление продуктов, подслащенных ИНП, не вызывают тягу к сладкому и неоправданное чувство голода.

Хотя ИНП сохраняют ту же вкусовую привлекательность, что и натуральные сахара, их метаболические пути различны [44]. Они влияют на вес тела и гомеостаз глюкозы иначе, чем натуральные сахара, через базовые физиологические процессы, включающие микробиоту кишечника, систему вознаграждения, адипогенез, секреторную способность инсулина, абсорбцию глюкозы в кишечнике и резистентность к инсулину. Хотя их безопасность была клинически оценена (FDA/EFSA), недавние исследования показывают, что они могут повышать риск рака, ожирения и диабета.

Испытания напитков, подслащенных сахарозой или искусственными подсладителями (ИП), показали, что, несмотря на пониженную калорийность напитков с ИП по сравнению с подслащенными сахарозой, потребление ИП не снижает риск ожирения и связанных с ним заболеваний. Это связано с неспособностью ИП эффективно снижать аппетит и, следовательно, общее потребление калорий [45].

Цикламат официально запрещен в США и Канаде из-за его канцерогенной активности; аспартам и сахарин изменяют микробиоту кишечника, ухудшают переносимость глюкозы [46]. Непереносимость глюкозы, в свою очередь, увеличивает риск метаболического синдрома, диабета 2 типа и сердечно-сосудистых заболеваний; сукралоза и ацесульфам-К увеличивают выброс инсулина, активируя рецепторы сладкого вкуса и рецепторы, чувствительные к кальцию. Искусственные подсластители не снижают уровень грелина, гормона, стимулирующего аппетит, уровень которого снижается после приема пищи. Это значит, что потребление искусственных подсластителей может инициировать более высокое потребление калорий, тем самым повышая риск ожирения. Употребление искусственно подслащенных напитков связано с повышенным риском инсульта и слабоумия. Аспартам известен также тем, что вызывает неврологические симптомы, такие как головные боли, судороги и мигрени.

Полезными натуральными некалорийными подсластителями считают стевию, архат, сахарные спирты и натуральные продукты. Однако противоречивые исследования показывают, что нет никакой разницы в гликемических и инсулиновых реакциях между стевией и глюкозой. Стевия может оказывать пагубное воздействие на микробиоту кишечника и гормональный баланс. При исследовании широко используемого в качестве заменителя сахара эритрита обнаружено, что после потребления напитка с эритритом значительно снизился уровень грелина по сравнению с аспартамом и увеличились различные показатели сытости у добровольцев. Это свидетельствует о возможности контроля аппетита и о снижении риска ожирения при потреблении эритрита.

Интересные исследования [47] по воздействию сладких и несладких углеводов на работоспособность спортсменов-велосипедистов в условиях высокой температуры окружающей среды 35 °C показали практически одинаковое (независимо от сладости) увеличение физической работоспособности (на 15,8% и 11,8% соответственно) по сравнению с водой.

Для глюкозы сладость оценивается в 70% от уровня сахарозы. Различия во вкусах изомеров глюкозы и маннозы объясняется их разным сродством к рецептору сладкого вкуса [48]. Хотя структура рецептора до конца не определена, существуют несколько моделей для механизма его связывания. Исследование гидратации глюкозы и маннозы показывает, что α- и β-глюкоза образуют сильные водородные связи с водой, соответствующие геометрической модели рецептора. α-Аномер маннозы (слабо сладкого вкуса) имеет похожую, гидратную оболочку, но с меньшим количеством и более слабыми водородными связями по сравнению с глюкозой. Гидратная оболочка β-маннозы (горького вкуса) не соответствует модели рецептора. Эти результаты предполагают прямую зависимость степени сладости от степени гидратации сахаров.

Несмотря на явный вред избыточного употребления сахаров, в пищевой промышленности продолжают создавать новые углеводные продукты с различной сладостью путем со-кристаллизации сахарозы с глюкозой или фруктозой, или смесью глюкозы и фруктозы, обладающими разной сладостью.

*4.6. Гигроскопичность*

Гигроскопичность фармацевтического средства или пищевого продукта влияет на его поведение на различных этапах процесса, производства, упаковки, хранения и транспортировки. Учитывая жизненно важное значение того, что гигроскопичность оказывает прямое и косвенное влияние на стабильность, внешний вид и эффективность, в обзоре [49] дано общее представление о классификации, определении гигроскопичности материалов, влиянии содержания влаги на материалы и приведены методы для устранения этого эффекта. Эти сведения очень полезны при принятии необходимых решений во избежание нежелательной реактивности и для повышения стабильности и эффективности получения желаемых конечных продуктов.

Поглощение влаги фармацевтическими и пищевыми продуктами приводит к их чрезмерному увлажнению и изменению физико-химических свойств, снижающих их качество и срок годности.

В исследованиях [50] образование гидратов в ангидридной α-глюкозе (α -АГ) и потеря гидратов в моногидрате глюкозы (МГ) изучались при различных значениях относительной влажности (ОВ) при хранении при температуре 25 °С с использованием насыщенных солевых суспензий в течение 1 года. Механизм образования гидратов и потери гидратов определялся с помощью математического моделирования данных динамической сорбции паров, а для подтверждения механизмов использовалась спектроскопия Рамана. Образование гидрата наблюдалось при > 68 % ОВ при 25 °С, и превращение α-АГ в МГ происходило вслед за процессом зародышеобразования. Потеря гидрата наблюдалась при < 11 % ОВ при 25 °С во время хранения и при 70 °С во время ТГА. Превращение МГ в α-АГ следует за механизмами зародышеобразования и диффузии.

Наши исследования гигроскопичности ангидридной глюкозы (α -АГ) [51] проводились в условиях различной относительной влажности, создаваемой в эксикаторе с использованием растворов серной кислоты, при комнатной температуре 20 ± 1,2 °С. Образцы глюкозы хранились на протяжении 70 суток в открытых бюксах с известной массой. Влажность образцов контролировали по изменению массы бюкс с глюкозой взвешиванием. Из Рисунка 4 следует, что исходные образцы α -АГ, имевшие влажность 0,05 %, при хранении в течение 70 дней в условиях ОВ 60 % оставались стабильными, с неизменной влажностью 0,05 %; образцы, хранившиеся при более высокой ОВ, за этот период заметно увлажнялись: до 0,13 % (при ОВ 70 %) и до 0,35 % (при ОВ 80 %). При влажности ОВ 90 % ангидридная глюкоза в течение 8 дней увлажнялась до 9 %, характерных для гидратной глюкозы, затем до конца опытов медленно адсорбировала влагу до 9,5 % с превращением в гидратную глюкозу.

Для защиты от влаги при хранении и транспортировке, как ангидридной, так и гидратной глюкозы, необходимо предусматривать соответствующую упаковку в многослойные крафт-мешки с полиэтиленовыми вкладышами.

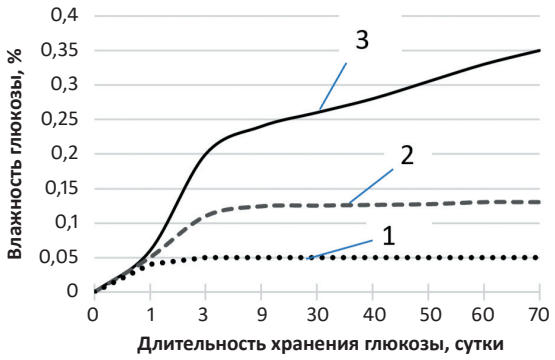



Рисунок 4. **Изменение влажности ангидридной глюкозы, в зависимости от относительной влажности воздуха, %: 1–60, 2–70, 3–80**

Figure 4. **Changes in moisture of anhydrous glucose depending on the relative humidity of the air, %: 1–60, 2–70, 3–80**

*4.7. Стабильность*

Вопросы стабильности для каждого продукта решаются по-разному, в зависимости от необходимости сохранности его свойств. Глюкоза используется в качестве ингредиента в разных пищевых и фармацевтических продуктах. Однако ее гигроскопичность, пониженная термостабильность и способность легко реагировать с несколькими веществами (например, аминокислотами, пептидами и белками), приобретая коричневую окраску, создают определенные проблемы в логистике и производстве пищевых продуктов и лекарств. Для решения проблем гигроскопичности лекарственных препаратов/нутрицевтиков предлагаются четыре варианта: пленочное покрытие, инкапсуляция путем распылительной сушки или коацервации, совместная обработка со вспомогательными веществами и со-кристаллизация с другими веществами [52]. Для гигроскопичных фармацевтических препаратов предпочтительны покрытие и со-кристаллизация, тогда как для нутрицевтиков (например, лекарственных трав и гидролизатов белков) чаще применяются покрытие и инкапсуляция.

По сообщениям авторов статьи [53] со-кристаллизация глюкозы с сахарозой позволяет избежать нежелательных реакций для глюкозы, понизить влажность гранул сахарозы/глюкозы до 0,1–1,5 мас.% и активность воды до 0,4–0,7. Кроме того, угол откоса гранул составил 40–45°, необходимых для сыпучих порошков при таблетировании. В опытах после смешивания гранул с бикарбонатом натрия (5:1) и выдерживания смесей в течение 12 дней при температуре 20 °С и влажности 75 % изменения их окраски не наблюдалось.

Также для улучшения сыпучести и таблетируемости глюкозы испытана непрерывная двухшнековая установка грануляции, которая может быть интегрирована в непрерывное производство кристаллической глюкозы [54]. Разработана полностью непрерывная производственная линия (включая сушку и измельчение), а также изучены и синхронизированы различные этапы производства. Линия дополнена встроенным спектроскопическим датчиком ближнего инфракрасного диапазона для контроля содержания влаги в измельченных гранулах в режиме реального времени. Сыпучесть и таблетируемость порошка значительно улучшились, и из гранул можно получать таблетки с приемлемым усилием разламывания. Разработанную линию грануляции можно легко внедрить в производство кристаллической глюкозы.

Одним из наиболее эффективных методов обеспечения долгосрочной стабильности различных фармацевтических и пищевых продуктов признана лиофилизация, или сублимационная сушка [55]. Лиофилизация — это метод дегидратации (высушивания) в пищевой, химической, фармацевтической и биотехнологической отраслях. Используется для консервирования пищевых продуктов, фармацевтических препаратов и широкого спектра других продуктов. Этот процесс требует времени и различных условий замораживания и сушки. Обзор дает четкое представление о каждом этапе сублимационной сушки, а также о достоинствах, недостатках и ограничениях этого процесса.

Нарушение стабильности в молекулах глюкозы вызывает ионизирующее излучение. В исследованиях украинских ученых рассматривались спектры фотолюминесценции и изменения, происходящие в молекулах глюкозы под действием фотонов [56]. Описаны методика измерений и результаты, полученные с помощью оптической спектроскопии при возбуждении молекул глюкозы фотонами. Впервые были изучены спектры фотолюминесценции глюкозы в диапазоне длин волн 400–700 нм при возбуждении фотонами различной энергии 3,26–4,51 eV. В спектрах люминесценции были обнаружены особенности (интенсивность излучения, положение максимумов), указывающие на возбуждение гидроксильного радикала ОН и карбонильной группы СОН в виде фрагментов молекулы глюкозы при воздействии фотонов. Были измерены спектры рентгеновской дифракции, которые подтвердили наличие гидрата глюкозы в исследуемых образцах и определенные структурные изменения после взаимодействия с фотонами. Показано, что фотонное облучение приводит к модификации молекулярных кристаллов глюкозы как на макро-, так и на микроуровне. Исследования моносахаридов с помощью фотонного воздействия дает обширную информацию об их уникальных свойствах, позволяет определить степень модификации кристаллической структуры и оценить параметры межмолекулярных связей. Такие исследования особенно важны для понимания процессов, происходящих при радиационном повреждении биологических систем.

## 5. Заключение

Глюкоза, обладая полифункциональными свойствами, широко используется в здравоохранении, фармацевтической и пищевой промышленностях, в ветеринарии.

Рынок глюкозы на мировом уровне является высококонкурентным и активно развивающимся. Объем рынка глюкозы до 2034 года будет стремительно расти и достигнет $9,2 млрд благодаря увеличению спроса в кондитерской промышленности, расширению производства функциональных продуктов питания и напитков, а также за счет роста использования глюкозы в производстве кормов для животных и фармацевтике.

Установлена природа повышенной растворимости β-глюкозы, что является ее преимуществом в инстантных продуктах. При определении коэффициентов скорости мутаротации циклических конформаций α-D-глюкозы и β-D-глюкозы установлено, что механизм переноса протона между кислородом альдегида и соседней гидроксильной группой происходит с участием молекул воды.

В ходе исследований метаболизма глюкозы выявлена ранее неизвестная способность нейронов головного мозга к самостоятельному гликолизу для собственного обеспечения энергией. Исследования глюкостатической теории ожирения показали, что резкие отклонения уровня глюкозы в крови от нормы (> или <) в период гипогликемии вызывают избыточное потребление пищи, избыточный вес и нарушение толерантности к глюкозе. Открыт рецептор сладости и исследован механизм влияния сладости на избыточное потребление пищи и здоровье человека. Особенно вредное влияние при этом оказывают фруктоза и искусственные подсластители.

Новые данные о физико-химических свойствах глюкозы по мутаротации, растворимости, кристаллизации, сладости, гигроскопичности, стабильности и их практическому использованию способствуют дальнейшему развитию глюкозного производства и сопредельных с ней сфер ее применения. Представляются перспективными актуальные направления: получение новых кристаллических форм, расширение производства ангидридной глюкозы, создание технологий распылительной сушки и лиофилизации, создание и внедрение новых продуктов со-кристаллизации глюкозы с другими веществами для расширения сфер использования в пищевой и фармацевтической промышленностях, здравоохранении, ветеринарии и др.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / REFERENCES


1. Singh, P. (2021). Glucose: A review. *International Journal of Research Publication and Reviews*, 2(12), 431–451.
2. Толмачева Е. А. (2018). Справочник Видаль Ветеринар 2019. Лекарственные средства для ветеринарного применения в России. М.: АстраФармСервис, 2018. [Tolmacheva, E.A. (2018). Reference book Bidal Veterinar 2019. Medicines for veterinary use in Russia. Moscow: AstraFarmServis, 2018. (In Russian)]
3. Хребтова, А. Ю., Быков, Е. В., Кузин, А. И., Камерер, О. В. (2022). Методологические подходы гликемического контроля в практике спорта по данным непрерывного мониторирования глюкозы. *Российский журнал спортивной науки: медицина, физиология, тренировки,* 1(1(1)), Статья 8. [Khrebtova, A. Yu., Bykov, E.V., Kuzin, A.I., Kamerer, O.V. (2022). Methodological approaches of glycemic control in sports practice based on continuous glucose monitoring data. *Russian Journal of Sports Science: Medicine, Physiology, Training*, 2022, 1(1(1)), Article 8. (In Russian)] https://doi.org/10.51871/2782-6570_2022_01_01_8
4. Business Research Company (2025). Dextrose Global Market Report 2025. Retrieved from https://www.thebusinessresearchcompany.com/report/dextrose-global-market-report Accessed March 17, 2025.
5. Global Info Research. (2024). Global Dextrose Monohydrate Supply, Demand and Key Producers, 2024–2030. Retrieved from https://www.globalinforesearch.com/reports/2227730/dextrose-monohydrate Accessed March 12, 2025.
6. DISCOVERY Research Group (2021). Анализ рынка глюкозы в России (с базой импорта-экспорта) (Демо версия). Электронный ресурс https://drgroup.ru/Analiz-rynka-glyukozy-v-Rossii.html Дата доступа 12.03.2025. [DISCOVERY Research Group (2021). Analysis of glucose market in Russia (with the base of import-export) (Demo version). Retrieved from https://drgroup.ru/Analiz-rynka-glyukozy-v-Rossii.html Accessed March 12, 2025. (In Russian)]
7. Лысиков, Ю. А. (2013). Углеводы в клиническом питании. *Экспериментальная и клиническая гастроэнтерология*, 2, 089–110. [Lysikov Yu. A. (2013). Carbohydrates in clinical nutrition. *Experimental and Clinical Gastroenterology Journal*, 2, 089–110. (In Russian)]
8. Chaput, J. -P., Tremblay, A. (2009). The glucostatic theory of appetite control and the risk of obesity and diabetes. *International Journal of Obesity,* 33(1), 46–53. https://doi.org/10.1038/ijo.2008.221
9. Hsu, G. C. (2022). Viscoelastic or Viscoplastic glucose theory (VGT #67): A study of postprandial plasma glucose versus carbohydrates and sugar intake grams and daily walking steps using a customized software program and VGT energy tool from physics and engineering based on GH-method: Math-physical medicine (No. 657). *Journal of Applied Material Science and Engineering Research*, 6(2), 01–06.
10. Maity, D., Guha Ray, P., Buchmann, P., Mansouri, M., Fussenegger, M. (2023). Blood-glucose-powered metabolic fuel cell for self-sufficient bioelectronics. *Advanced Materials*, 35(21), Article 2300890. https://doi.org/10.1002/adma.202300890
11. Geidl-Flueck, B., Hochuli, M., Németh, Á., Eberl, A., Derron, N., Köfeler, H. C. et al. (2021). Fructose- and sucrose- but not glucose-sweetened beverages promote hepatic de novo lipogenesis: A randomized controlled trial. *Journal of Hepatology,* 75(1), 46–54.
12. Williams, S. C. R. (2023). Sugar rush: Scientists discover key role of glucose in brain activity. Retrieved from https://gladstone.org/news/sugar-rush-scientists-discover-key-role-glucose-brain-activity Accessed April 16, 2025.
13. Li, H., Guglielmetti, C., Sei, Y. J., Zilberter, M., Le Page, L. M., Shields, L. et al. (2023). Neurons require glucose uptake and glycolysis in vivo. *Cell Reports*, 42(4), Article 112335. https://doi.org/10.1016/j.celrep.2023.112335
14. Хворова Л. С. (2013). Научно-практические основы получения кристаллической глюкозы. М.: Россельхозакадемия, 2013. [Khvorova, L.S. (2013). Scientific practical foundations of production of crystalline glucose. Moscow: Russian Academy of Agricultural Sciences, 2013. (In Russian)]
15. Pan, S. (2024). Mutarotation — Definition, Mechanism, Measurement, Example. Retrieved from https://biologynotesonline.com/mutarotation/ Accessed March 12, 2025.
16. Silva, A. M., da Silva, E. C., da Silva, C. O. (2006). A theoretical study of glucose mutarotation in aqueous solution. *Carbohydrate Research*, 341(8), 1029–1040. https://doi.org/10.1016/j.carres.2006.02.035
17. Hossain, M., Chowdhury, N., Atahar, A., Susan, Md. A. B. H. (2023). Water structure modification by D-(+)-glucose at different concentrations and temperatures-effect of mutarotation. *RSC Advances*, 13(28), 19195–19206. https://doi.org/10.1039/d3ra03081d
18. Srisa-nga, S., Flood, A., White, E.T. (September 7–9, 2005). *Analysis of effect of mutarotation reaction on the crystallization of alpha-glucose monohydrate.* Processing of the 12th International Workshop on Industrial Cristallization. Martin-Luther-Universytat Halle -Wittenberg, 2005.
19. Перелыгин, В. М., Крыльский, Д. В., Гулюк, Н. Г. (1991). Влияние мутаротации на кинетику массовой кристаллизации глюкозы. *Известия высших учебных заведений. Пищевая технология,* 4–6(203–205), 36–39. [Perelygin, V.M., Krylskiy, D.V., Gulyuk, N.G. (1991). Effect of mutarotation on kinetics of mass crystallization of glucose. *Izvestiya VUZOV. Food Technology,* 4–6(203–205), 36–39. (In Russian)]
20. Le Barc'H, N., Grossel, J. M., Looten, P., Mathlouthi, M. (2001). Kinetic study of the mutarotation of d-glucose in concentrated aqueous solution by gas-liquid chromatography. *Food Chemistry,* 74(1), 119–124. https://doi.org/10.1016/S0308-8146(01)00139-X
21. Ramesh, P., Kritikos, A., Tsilomelekis, G. (2019). Effect of metal chlorides on glucose mutarotation and possible implications on humin formation. *Reaction Chemistry and Engineering*, 4(2), 273–277.
22. Li, Z., Luo, Y., Wang, X., Jiang, Z., Xu, S., Hu, C. (2020). The effect of sodium chloride concentration on the mutarotation and structure of d-xylose in water: Experimental and theoretical investigation. *Carbohydrate Research*, 489, Article 107941. https://doi.org/10.1016/j.carres.2020.107941
23. Шипунов, Б.П., Рябых, А.В. (2019). Влияние высокочастотного электромагнитного поля на мутаротацию водных растворов глюкозы и фруктозы. *Химия растительного сырья,* 3, 235–240. [Shipunov, B. P., Ryabykh, A. V. (2019). Effect of high-frequency electromagnetic field on the mutarotation of aqueous solutions of glucose and fructose. *Chemistry of Plant Raw Material*, 3, 235–240. (In Russian)] https://doi.org/10.14258/jcprm.2019034456s
24. Хворова, Л. С. (2019). Особенности технологии получения кристаллической бета-глюкозы. *Пищевая промышленность*, 6, 54–57. [Khvorova, L. S. (2019). Features oftechnology forcrystalline beta-glucose. *Food Industry*, 6, 54–57. (In Russian)] https://doi.org/10.24411/0235-2486-2019-10089
25. Bakó, I., Pusztai, L., Pothoczki, S. (2024). Outstanding properties of the hydration shell around β-d-glucose: A computational study. *ACS Omega*, 9(18), 20331–20337. https://doi.org/10.1021/acsomega.4c00798
26. Андреев, Н. Р., Хворова, Л. С., Золотухина, Н. И. (2010). Кинетика зародышеобразования при изотермической кристаллизации ангидридной глюкозы. *Сахар,* 12, 55–58. [Andreev, N.R., Khvorova, L.S., Zolotukhina, N.I. (2010). Kinetics of nucleation during isothermal crystallization of anhydride glucoze. *Sugar,* 12, 55–58. (In Russian)]
27. Flood, A. E., Srisanga, S. (2012). An improved model of the seeded batch crystallization of glucose monohydrate from aqueous solutions. *Journal of Food Engineering*, 109(2), 209–217. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.09.035
28. Jit, T., Shil, D., Kumari Dasgupta, R., Mallick, S., Mukherjee, S. (2023). Cocrystal: A review on the design and preparation of pharmaceutical cocrystals. *Asian Journal of Research in Pharmaceutical Sciences,* 13(4), 296–302. https://doi.org/10.52711/2231-5659.2023.00050
29. Хворова, Л.С. (2021). Кристаллическая субстанция глюкозы с хлоридом натрия, физико-химические свойства. *Достижения науки и техники АПК*, 35(8), 51–56. [Khvorova, L. S. (2021). Physico-chemical properties of the crystalline substance of glucose with sodium chloride. *Achievements of Science and Technology in Agro-Industrial Complex*, 35(8), 51–56. (In Russian)] https://doi.org/10.53859/02352451_2021_35_8_51
30. Kang, X.-Y., Chang, Y.-D., Wang, J.-D., Yang, L.-M., Xu, Y.-Z., Zhao, G.-Z. et al. (2020). Sugar-metal ion interaction: Crystal structure and spectroscopic study of potassium chloride complex with d-glucose, KCl·2C6H12O6. *Journal of Molecular Structure,* 1206, Article 127671. https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2019.127671
31. López-Córdoba, A., Navarro, A. (2018). Physicochemical properties and stability of sucrose/glucose agglomerates obtained by cocrystallization. *Journal Food Process Engineering*, 41(8), Article e12901. https://doi.org/10.1111/jfpe.12901
32. Bhandari, B. R., Hartel, R. W. (2006). Co-crystallization of sucrose at high concentration in the presence of glucose and fructose. *Food Science*, 67(5), 1797–1802. https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2002.tb08725.x
33. Von Molitor, E., Riedel, K., Krohn, M., Hafner, M., Rudolf, R., Cesetti, T. (2021). Sweet taste is complex: Signaling cascades and circuits involved in sweet sensation. *Frontiers in Human Neuroscience,* 15, Article 667709. https://doi.org/10.3389/fnhum.2021.667709
34. Kresser, C. (2019). Here's the research on sugar and health. Retrieved from https://chriskresser.com/heres-the-research-on-sugar-and-health/ Accessed April 18, 2025.
35. Gangwisch, J.E, Hale L, St-Onge, M.-P., Choi L., LeBlanc, E.S., Malaspina, D, et al. (2020). High glycemic index and glycemic load diets as risk factors for insomnia: Analyses from the Women's Health Initiative. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 111(2), 429–439. https://doi.org/10.1093/ajcn/nqz275
36. Aghaee, B., Moradi, F., Soleimani, D., Moradinazar, M., Khosravy, T., Samadi, M. (2023). Glycemic index, glycemic load, dietary inflammatory index, and risk of infertility in women. *Food Science and Nutrition*, 11(10), 6413–6424. https://doi.org/10.1002/fsn3.3584
37. Higginbotham, S., Zhang, Z.-F., Lee, I–M., Cook, N.R., Giovannucci, E., Buring, J.E. et al. (2004). Dietary glycemic load and risk of colorectal cancer in the women's health study. *Journal of the National Cancer Institute*, 96(3), 229–233. https://doi.org/10.1093/jnci/djh020
38. Дехисси, Е.И., Станоевич, У.С., Гребёнкин, Е. Н. Чхиквадзе, В.Д. (2013). Патогенетические особенности колоректального рака на фоне нарушений жирового и углеводного обмен. *Вестник российского научного центра рентгенорадиологии,* 13–2, Статья 5. [Dehissi, E.I., Stanojevic, U.S., Grebyonkin, E.N., Chkhikvadze, V.D (2013). The pathophysiologic characteristics of colorectal cancer in association with the lipid and carbohydrate metabolism disorders. *Vestnik of the Russian Scientific Center of Roentgenoradiology*, 13–2, Article 5. (In Russian)]
39. Laffitte, A., Neiers, F., Briand, L. (2014). Functional roles of the sweet taste receptor in oral and extraoral tissues. *Current Opinion in Clinical Nutrition and Metabolic Care*, 17(4), 379–385. https://doi.org/10.1097/mco.0000000000000058

40. DiNicolantonio, J. J., O'Keefe, J. H., Wilson, W. L. (2018). Sugar addiction: Is it real? A narrative review. *British Journal of Sports Medicine*, 52(14), 910–913. https://doi.org/10.1136/bjsports-2017-097971
41. May, C. E., Rosander, J., Gottfried, J., Dennis, E., Dus, M. (2020). Dietary sugar inhibits satiation by decreasing the central processing of sweet taste. *ELife,* 16(9), Article e54530. https://doi.org/10.7554/eLife.54530
42. Carvalho, C., de Souza, M., Arbex, N., Sá, D., de Souza Rodrigues, L., de Sá, D. et al. (2018). The role of fructose in public health and obesity. *Health*, 10(04), 434–441. https://doi.org/10.4236/health.2018.104035
43. Wilk, K., Korytek, W., Pelczyńska, M., Moszak, M., Bogdański, P. (2022). The effect of artificial sweeteners use on sweet taste perception and weight loss efficacy: A review. *Nutrients,* 14(6), Article 1261. https://doi.org/10.3390/nu14061261
44. Pang, M. D., Goossens, G. H., Blaak, E. E. (2021). The impact of artificial sweeteners on body weight control and glucose homeostasis. *Frontiers in Nutrition,* 7, Article 598340. https://doi.org/10.3389/fnut.2020.598340
45. Sorrentino, Z. A., Smith, G., Palm, L., Motwani, K., Butterfield, J., Archer, C. et al. (2020). An erythritol-sweetened beverage induces satiety and suppresses ghrelin compared to aspartame in healthy non-obese subjects: A pilot study. *Cureus,* 12(11), Article e11409. https://doi.org/10.7759/cureus.11409
46. Cabral, T. M., Pereira, M. G. B., Falchione, A. E. Z., Sá, D. A. R. de, Correa, L., Fernandes, D. da M. et al. (2018). Artificial sweeteners as a cause of obesity: Weight gain mechanisms and current evidence. *Health,* 10, 700–717. https://doi.org/10.4236/health.2018.105054
47. Carter, J., Jeukendrup, A. E., Jones, D. A. (2005). The effect of sweetness on the efficacy of carbohydrate supplementation during exercise in the heat. *Canadian Journal of Applied Physiology*, 30(4), 379–391. https://doi.org/10.1139/h05-128
48. Rhys, N. H., Bruni, F., Imberti, S., McLain, S. E., Ricci, M. A. (2017). Glucose and mannose: A link between hydration and sweetness. *The Journal of Physical Chemistry B*, 121(33), 7771–7776. https://doi.org/10.1021/acs.jpcb.7b03919
49. Anbarasan, A., Nataraj, J., Shanmukhan, N., Radhakrishnan, A. (2018). Effect of hygroscopicity on pharmaceutical ingredients, methods to determine and overcome: An overview. J*ournal of Chemical and Pharmaceutical Research,* 10(3), 61–67.
50. Scholl, S. K., Schmidt, S. J. (2014). Determining the mechanism and parameters of hydrate formation and loss in glucose. *Journal of Food Science*, 79(11), E2232-E2244. https://doi.org/10.1111/1750–3841.12671
51. Хворова, Л. С. (2020). Виды кристаллической глюкозы для получения растворов и таблетированных форм. *Фармация*, 69(5), 24–29. [Khvorova, L. S. (2020). Types of crystalline glucose for the preparation of solutions and tablet dosage forms. *Farmatsiya*, 69(5), 24–29. (In Russian)] https://doi.org/10/29296/25419218-2020-05-04
52. Ng, L. H., Ling, J. K. U., Hadinoto, K. (2022). Formulation strategies to improve the stability and handling of oral solid dosage forms of highly hygroscopic pharmaceuticals and nutraceuticals. *Pharmaceutics,* 14(10), Article 2015. https://doi.org/10.3390/pharmaceutics14102015
53. Dhondale, M. R., Thakor, P., Nambiar, A. G., Singh, M., Agrawal, A. K., Shastri, N. R. et al. (2023). Co-crystallization approach to enhance the stability of moisture-sensitive drugs. *Pharmaceutics,* 15(1), Article 189. https://doi.org/10.3390/pharmaceutics15010189
54. Záhonyi, P., Szabó, E., Domokos, A., Haraszti, A., Gyürkés, M., Moharos, E. et al. (2022). Continuous integrated production of glucose granules with enhanced flowability and tabletability. *International Journal of Pharmaceutics*, 626, Article 122197. https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2022.122197
55. Tajir, H., Parab, I. (2022). Theory and practice of freeze drying in pharmaceuticals. *International Journal of Pharmacy and Pharmaceutical Research*, 25(3), 225–240.
56. Bandurin, Y. A., Zavilopulo, A. N., Popik, T. Yu., Molnar, Sh. B., Solomon, A. M., Bulhakova, A. I. (2023). Fluorescence excitation spectroscopy of glucose molecules. *Journal of Physics and Optics Sciences,* 5(1), 1–7. https://doi.org/10.47363/JPSOS/2023(5)177



| СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ | AUTHOR INFORMATION |
|---|---|
| **Принадлежность к организации** | **Affiliation** |
| **Хворова Людмила Степановна** — доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией технологии глюкозы, Всероссийский научно-исследовательский институт крахмала и переработки крахмалсодержащего сырья — филиал Федерального исследовательского центра картофеля имени А. Г. Лорха<br>140051, Московская область, Люберцы, п. Красково, ул. Некрасова, 11<br>E-mail: dekstrosa@rambler.ru<br>ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2441-4681 | **Ludmila S. Khvorova**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Researcher, Head of Laboratory of Glucose, All-Russian Research Institute of Starch and Starch-containing Raw Materials Processing — Branch of Russian Potato Research Centre<br>11, Nekrasov str., 140051, Kraskovo, Lyubertsy, Moscow region, Russia<br>E-mail: dekstrosa@rambler.ru<br>ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2441-4681 |
| **Андреев Николай Руфеевич** — доктор технических наук, член-корреспондент РАН, научный руководитель, Всероссийский научно-исследовательский институт крахмала и переработки крахмалсодержащего сырья — филиал Федерального исследовательского центра картофеля имени А. Г. Лорха<br>140051, Московская область, Люберцы, п. Красково, ул. Некрасова, 11<br>E-mail: andreev@arrisp.ru<br>ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8312-8135<br>* автор для контактов | **Nikolay R Andreev**, Doctor of Technical Sciences, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Scientific Supervisor, All-Russian Research Institute of Starch and Starch-containing Raw Materials Processing — Branch of Russian Potato Research Centre<br>11, Nekrasov Str., 140051, Kraskovo, Lyubertsy, Moscow region, Russia<br>E-mail: andreev@arrisp.ru<br>ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8312-8135<br>* corresponding author |
| **Бызов Василий Аркадьевич** — кандидат сельскохозяйственных наук, директор, Всероссийский научно-исследовательский институт крахмала и переработки крахмалсодержащего сырья — филиал Федерального исследовательского центра картофеля имени А. Г. Лорха<br>140051, Московская область, Люберцы, п. Красково, ул. Некрасова, 11<br>E-mail: byzov1966@yandex.ru<br>ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1918-4455 | **Vasily A Byzov**, Candidate of Agricultural Sciences, Director, All-Russian Research Institute of Starch and Starch-containing Raw Materials Processing — Branch of Russian Potato Research Centre<br>11, Nekrasov Str., 140051, Kraskovo, Lyubertsy, Moscow region, Russia<br>E-mail: byzov1966@yandex.ru<br>ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7288-8569 |
| **Критерии авторства** | **Contribution** |
| Авторы в равных долях имеют отношение к написанию рукописи и одинаково несут ответственность за плагиат. | The author has the sole responsibility for writing the manuscript and is 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/10.21323/2618-9771-2025-8-3-401-406

Поступила 14.06.2025
Поступила после рецензирования 19.09.2025
Принята в печать 23.09.2025
© Ким А. А., Баланов П. Е., Смотраева И. В., 2025

https://www.fsjour.com/jour
Обзорная статья
Open access

# ВЛИЯНИЕ ФЕРМЕНТАЦИИ БОБОВЫХ НА СНИЖЕНИЕ АНТИПИТАТЕЛЬНОГО ФАКТОРА. ОБЗОР

Ким А. А.*, Баланов П. Е., Смотраева И. В.
Факультет биотехнологий, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

*КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:* *антинутриенты, ферментация, бобовые, фитаты, сапонины, танины*

АННОТАЦИЯ
Бобовые являются ценным пищевым сырьем благодаря содержанию растительного белка, незаменимых аминокислот и клетчатки. Однако они содержат антипитательные вещества, такие как танины, фитаты, олигосахариды, оксалаты, сапонины и ингибиторы протеазы, которые при чрезмерном потреблении или неправильной технологической обработке могут оказывать негативное и даже токсическое воздействие на организм человека. В условиях растущего спроса на продукты питания из растительного сырья, в том числе бобовые, возникает необходимость сокращать риски, связанные с избыточным потреблением антинутриентов. Целью данной статьи является анализ исследований последних пяти лет, посвященных оценке эффективности основных методов технологической обработки бобовых (замачивание, термическая обработка, проращивание и ферментация) для снижения содержания антипитательных веществ. Также проведено сравнение полученных данных для выявления наиболее эффективных методов. Результаты обзора доказывают целесообразность комбинирования нескольких методов обработки бобовых для снижения содержания антинутриентов и повышения пищевой ценности продуктов из бобового сырья. На основе проанализированных данных был определен наиболее эффективный подход к переработке бобовых, который значительно снижает основные антинутриенты в бобовых. Рассмотрено влияние ключевых антинутриентов на здоровье человека и проанализированы основные проблемы пищевой промышленности, связанные с ферментацией бобовых.

Received 14.06.2025
Accepted in revised 19.09.2025
Accepted for publication 23.09.2025
© Kim A. A., Balanov P. E., Smotraeva I. V., 2025

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

# EFFECT OF LEGUME FERMENTATION ON THE REDUCTION OF THE ANTI-NUTRITIONAL FACTOR. REVIEW

Anastasia A. Kim*, Petr E. Balanov, Irina V. Smotraeva
Faculty of Biotechnologies, ITMO University, Saint Petersburg, Russia

*KEY WORDS:* *anti-nutrients, fermentation, legumes, phytates, saponins, tannins*

ABSTRACT
Legumes are valuable food raw materials due to the content of plant protein, essential amino acids and fiber. However, they contain anti-nutrients such as tannins, phytates, oligosaccharides, oxalates, saponins and protease inhibitors, which upon excessive intake or improper technological processing can have a negative and even toxic effect on the human body. In the conditions of the growing demand for food products from plant raw materials, including legumes, there is a necessity to reduce risks associated with excessive intake of anti-nutrients. The aim of this work was to analyze studies carried out over the last five years that are dedicated to an assessment of the efficiency of the main methods for technological processing of legumes (soaking, thermal processing, sprouting and fermentation) to reduce the content of anti-nutrients. Also, the comparison of the obtained data was carried out to reveal the most effective methods. The results of the review prove the expediency of combination of several methods of legume treatment to reduce the content of anti-nutrients and increase the nutritional value of products from leguminous raw materials. Based on the analyzed data, the most efficient approach to legume processing was determined. This approach significantly reduces the main anti-nutrients in legumes. An effect of the key anti-nutrients on human health has been examined and the main problems of the food industry linked to legume fermentation have been analyzed.

## 1. Введение

Бобовые являются ценным источником растительного белка, клетчатки, витаминов и минералов, что делает их распространенным продуктом питания во многих странах мира. Обзор обобщает новейшие исследования в области переработки бобового сырья и соотносит их с промышленными и потребительскими потребностями, при этом особое внимание уделяется разработке технологий производства ферментированных бобовых продуктов с улучшенной функциональностью и пользой для здоровья [1,2].

Несмотря на то, что бобовые являются устойчивым источником белка, антипитательные вещества (АПВ), содержащиеся в них, ограничивают его биодоступность и усвояемость. Традиционные методы технологической переработки бобовых (такие как замачивание, термическая обработка) лишь частично удаляют АПВ, тогда как направленная ферментация предлагает более эффективную альтернативу, способствующую сохранению пищевой ценности [3–6]. Целенаправленный обзор исследований, проведенных в период 2021–2025 гг., подчеркивает прорывы в микробной селекции для ферментации бобовых, оптимизации процесса и понимания механизма деградации АПВ, имеющих решающее значение для разработки новых продуктов на основе бобовых. Недавние исследования подтверждают, что такие бобовые, как фасоль, чечевица, нут, горох и соя, при регулярном потреблении благоприятно влияют на организм человека, улучшая обмен веществ и способствуя профилактике дефицита белка и заболеваний сердечно-сосудистой системы [7]. Так, ежедневное употребление нута снижает риски, связанные с ишемической болезнью сердца, а также положительное воздействие при диабете второго типа [8]. Ежедневное употребление чечевицы в течение 12 недель улучшает разнообразие микробиоты кишечника и уменьшает воспаление [9]. Регулярное употребление бобовых снижает риск развития рака органов пищеварения на 15% [10].

Несмотря на вышеупомянутые преимущества для здоровья потребителей, бобовые содержат природные соединения, известные как АПВ, которые могут мешать усвоению питательных веществ, снижая их биодоступность и негативно влияя на процессы пищеварения [11].

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: **Ким, А. А., Баланов, П. Е., Смотраева, И. В.** (2025). Влияние ферментации бобовых на снижение антипитательного фактора. Обзор. *Пищевые системы*, 8(3), 401–406. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-3-401-406

FOR CITATION: **Kim, A. A., Balanov, P. E., Smotraeva, I. V.** (2025). Effect of legume fermentation on the reduction of the anti-nutritional factor. Review. *Food Systems*, 8(3), 401–406. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-3-401-406

Основные АПВ в бобовых включают фитины или фитиновую кислоту, ингибиторы протеазы, танины, оксалаты и олигосахариды. Недавние исследования показывают, что в небольших количествах АПВ, содержащиеся в бобовых, могут оказывать благотворное воздействие на организм, если потреблять их в контролируемых количествах. Фитаты, танины и флавоноиды в бобовых действуют как мощные антиоксиданты, снижая окислительный стресс и воспаление; сапонины и флавоноиды в обработанном нуте и чечевице демонстрируют антипролиферативное действие против раковых клеток и помогают поддерживать иммунную функцию; олигосахариды действуют как пребиотики, способствуя поддержанию здоровой микробиоты; танины и сапонины помогают снизить уровень холестерина, связывая желчные кислоты и уменьшая всасывание липидов [2,3,5,6,12].

Однако чрезмерное потребление необработанных бобовых может снижать усвоение белка и приводить к дефициту биологически значимых элементов, таких как железо, цинк и кальций, а также вызывать дискомфорт в пищеварительной системе, включая вздутие живота и метеоризм [9,11].

АПВ, присутствующие в бобовых, могут быть токсичными при употреблении в больших количествах или без надлежащей обработки [13]. Ряд исследований показал, что лимская фасоль (*Phaseolus lunatus*) содержит линамарин, цианогенный гликозид, который при гидролизе выделяет цианистый водород. Дикие сорта лимской фасоли содержат 10–300 мг цианистого водорода в 100 г, в то время как одомашненные сорта содержат менее 10 мг/100 г. Линамарин может вызвать отравление цианидом, которое сопровождается головокружением, головной болью, рвотой и в крайних случаях может привести к летальному исходу [11–13]. Таким образом, существует необходимость в предварительной обработке бобового сырья для снижения АПВ.

Следующие научные данные подтверждают потенциальную токсичность основных антипитательных веществ, содержащихся в бобовых. Лектины или гемагглютинины доказали свою токсичность. Ингибиторы трипсина и химотрипсина блокируют пищеварительные ферменты, что приводит к гипертрофии поджелудочной железы. Кроме того, регулярное употребление сырых соевых бобов с высоким содержанием ингибиторов трипсина приводило к задержке роста у животных [14–18]. Обширные исследования выявили потенциальную токсичность АПВ, присутствующих в бобовых, при этом особое внимание уделялось лектинам и ингибиторам протеазы. Лектины проявили выраженные токсические эффекты в организме человека и животных. Эти связывающие углеводы белки могут противостоять перевариванию и связываться с эпителиальными клетками кишечника, вызывая повреждение слизистой оболочки кишечника и препятствуя усвоению питательных веществ [17]. В тяжелых случаях потребление лектинов было связано с поражениями кишечника, с нарушением иммунной функции и даже с системной токсичностью. Ингибиторы протеазы, особенно ингибиторы трипсина и химотрипсина, представляют еще одну серьезную проблему. Эти соединения блокируют активность пищеварительных ферментов в желудочно-кишечном тракте, что приводит к гипертрофии поджелудочной железы, поскольку орган пытается компенсировать это, вырабатывая дополнительные ферменты [18].

Регулярное потребление продуктов, богатых этими ингибиторами, включая сырые соевые бобы, вызывает значительную задержку роста, что было продемонстрировано в исследованиях на животных. Исследования показывают, что рацион с высоким содержанием сырых соевых бобов у животных приводит к снижению усвоения белка и задержке роста из-за нарушений переваривания белка и усвоения аминокислот. Антипитательные эффекты проявляются не только в нарушении переваривания белка. Например, фитиновая кислота прочно хелатирует некоторые макро- и микроэлементы, включая железо, цинк и кальций, образуя нерастворимые комплексы, которые плохо усваиваются в пищеварительном тракте [18]. Эта способность связывать минералы может привести к их дефициту, даже если количество минералов в рационе кажется достаточным. Кроме того, некоторые АПВ могут мешать метаболическим процессам; например, некоторые ингибиторы протеазы были вовлечены в нарушение нормальной функции поджелудочной железы через механизмы обратной связи, которые изменяют выработку ферментов.

Фитаты обладают сильной связывающей активностью по отношению к минералам, таким как железо, снижая его усвоение на 50–80%. Это оказывает существенное влияние на людей в развивающихся странах, где бобовые являются основной частью ежедневного рациона, поскольку потребление бобовых без надлежащей обработки способствует железодефицитной анемии [19].

Несколько исследований подтверждают, что потребление большого количества оксалатов увеличивает риск образования камней в почках и препятствует усвоению кальция [20,21]. Известны случаи отравления сырыми бобами, когда употребление всего 4–5 сырых или недоваренных бобов вызывало сильную тошноту, рвоту, диарею и боли в животе из-за высокого содержания лектинов, а именно фитогемагглютинина. Механизм этих эффектов связан со способностью лектинов связываться с клетками кишечника, нарушать усвоение питательных веществ и вызывать воспаление, приводящее к повреждению слизистой оболочки [22,23].

Фитиновая кислота, содержащаяся в значительных количествах в соевых бобах, чечевице, нуте и горохе, может образовывать связи с веществами (такими как железо, цинк, кальций и магний), снижая их биодоступность, в то время как ингибиторы трипсина и химотрипсина подавляют пищеварительные ферменты, ухудшая переваривание и всасывание белков [24,25]. Красная фасоль, соевые бобы и черная фасоль содержат антипитательные вещества, такие как лектины, которые могут вызывать тошноту, рвоту и диарею, если их употреблять в сыром виде или недоваренными, т. е. при приготовлении менее 10 минут [26]. Танины, присутствующие в цветных бобовых (например, в черной фасоли и чечевице), связываются с белками и биологически значимыми элементами, снижая усвояемость и всасывание питательных веществ, в то время как оксалаты связывают кальций, провоцируя образование камней в почках у предрасположенных к этому людей [5]. Олигосахариды раффиноза и стахиоза могут ферментироваться кишечными бактериями, что приводит к образованию газов и вздутию живота, а сапонины могут вызывать горечь и влиять на усвоение питательных веществ [27].

Современные данные об эффективности процессов ферментации подчеркивают ключевую роль микробных ферментов во взаимодействии с АПВ растительного сырья. Исследователи предполагают, что микроорганизмы продуцируют фитазы и целлюлазы, которые гидролизуют фитиновую кислоту и олигосахариды [4,14]. Белки, являющиеся ингибиторами протеазы, также подвержены влиянию микробных ферментов, протеаз, гидролизуют белковые матрицы и улучшают питательные свойства субстратов [15]. В случае танинов исследования показывают, что некоторые микроорганизмы могут продуцировать ферменты эстеразы и значительно изменять концентрацию этих соединений [16].

Несколько исследований подтверждают, что необработанные бобовые с высоким содержанием АПВ отрицательно влияют на рост и развитие как человека, так и сельскохозяйственных животных [17,18]. Эти результаты подчеркивают необходимость осведомленности потребителей о содержании АПВ и внедрения эффективных методов обработки для смягчения их неблагоприятных последствий при сохранении пищевой ценности продуктов на основе бобовых.

## 2. Объекты и методы

Чтобы предоставить всесторонний обзор стратегий снижения АПВ, были проанализированы последние исследования и обзорные статьи за период с 2021 по 2025 год. Поиск проводился по нескольким научным базам данных, включая PubMed, Springer, PubChem и Google Scholar, чтобы обеспечить широкий охват рецензируемых исследований.

Публикации были отобраны с использованием целевых ключевых слов и их комбинаций, таких как: бобовые, антипитательные вещества, АПВ, фитаты, оксалаты, танины, сапонины, лектины, ингибиторы протеазы, ферментация бобовых, прорастание бобовых, проращивание бобовых, термическая обработка бобовых, не термическая обработка бобовых. Критерии включения были сосредоточены на последних достижениях в методах деградации АПВ, сравнительных исследованиях, оценивающих методы обработки и результаты в отношении питания, такие как биодоступность, усвояемость и влияние на здоровье.

## 3. Известные технологические подходы для снижения антипитательных свойств бобового сырья

Исследования подтверждают, что кипячение в течение 20–30 минут разрушает более 95% лектинов в черных бобах и чечевице [1]. Ферментация снижает количество фитатов на 60–80% [14]. Например, фитиновая кислота была снижена во время ферментации соевого молока *S. thermophilus, Lb. fermentum, Lb. plantarum, Lb. casei, Lb. bulgaricus u Lb. acidophilus* [28]. Автоклавирование бобовых при 121 °C в течение 15–20 минут снижает количество ингибиторов трипсина на 70–85%, но если за этим следует ферментация *Bacillus*, то это количество снижается до 90–95% [29]. Уменьшение олигосахаридов на 50–70% наблюдалось при предварительном замачивании со сменой воды с последующей варкой [30]. Также было подтверждено снижение содержания танинов после очистки бобовых с последующей ферментацией [31]. Уровень оксалатов снижается до 60–90% при приготовлении со сменой воды [32].

В Таблице 1 обобщены данные по недавним исследованиям, касающиеся различных типов обработки, снижающих АПВ в бобовых.

В Таблице 1 приведены сравнительные данные о влиянии наиболее распространенных методов обработки бобовых на содержание АПВ. В результате анализа информации было установлено, что основными направлениями в снижении содержания АПВ являются термическая обработка и ферментация. Сочетание этих методов позволяет снизить количество АПВ до 95 % и представляется одним из наиболее перспективных способов.

Также сравнительный анализ, представленный в Таблице 1, раскрывает важные сведения об оптимизированных методах обработки для снижения различных АПВ в бобовых, при этом каждый метод показывает различные уровни эффективности против определенных АПВ. Данные показывают, что для эффективного снижения содержания различных АПВ необходимы индивидуальные подходы к обработке, учитывающие их уникальные химические свойства и профили стабильности.

Лектины показывают наиболее резкое снижение (>95 %) при простом кипячении при температуре 100 °C в течение 10 минут, что подтверждено многочисленными исследованиями. Такая высокая эффективность достигается за счет того, что лектины являются термолабильными белками, которые полностью денатурируют при температурах кипения, теряя способность связывать углеводы и вызывать повреждение кишечника. Воспроизводимость этого результата для всех сортов бобовых делает кипячение одним из самых надежных методов дезактивации лектинов. Для сокращения количества фитатов лучшим подходом является ферментация, способствующая снижению содержания этого антинутриента на 60–80 %, особенно в традиционных продуктах, таких как темпе и натто. Микробные фитазы, образующиеся во время ферментации, значительно более эффективны для разрушения фитатных комплексов, чем растительные фитазы, активируемые во время замачивания [1]. Длительность времени ферментации обычно составляет 24–48 часов, что обеспечивает почти полный гидролиз молекул фитата, высвобождая связанные минералы, такие как железо и цинк.

Таблица 1 показывает исключительную эффективность, достигающую 90–95 % в отношении сокращения ингибиторов протеаз посредством комбинированного автоклавирования и ферментации *Bacillus* [30]. Особый интерес в данном случае представляет двухступенчатый механизм обработки — автоклавирование обеспечивает немедленную термическую денатурацию, в то время как последующая ферментация позволяет протеазам, полученным из *Bacillus*, дополнительно расщеплять термостойкие фракции ингибиторов. Этот комбинированный подход кажется более эффективным, чем любой из методов по отдельности.

Олигосахариды, такие как раффиноза, демонстрируют умеренное снижение в пределах 50–70 % посредством замачивания и кипячения, при этом особенно подчеркивается важность смены воды для замачивания [31]. Этот двухэтапный процесс работает посредством диффузии через замачивание, которое способствует удалению водорастворимых олигосахаридов, а затем следует термическое расщепление оставшихся соединений. Умеренная эффективность связана с тем, что некоторые олигосахариды по своей природе устойчивы к расщеплению и могут потребовать ферментативной обработки для полного удаления.

Установлено, что концентрация танинов сокращается на 40–60 % в зависимости от метода обработки, при этом исследования указывают, что комбинированный подход с шелушением бобовых с последующей ферментацией дают наилучший результат [32]. Это объясняется тем, что танины концентрируются в оболочках семян, делая их физическое удаление эффективным, в то время как ферментация помогает разложить оставшиеся танины посредством микробной активности танназы. Сравнительно более низкая эффективность по сравнению с другими АПВ объясняется химической стабильностью танинов и их разнообразием в бобовых.

Оксалаты демонстрируют снижение концентрации в широком диапазоне 60–90 % при кипячении со сменой воды [33]. Разброс значений связан с видом бобовых и с исходным уровнем оксалатов: водорастворимые формы удаляются легко, тогда как комплексы кальция и оксалата требуют более интенсивной обработки. Эффективность значительно возрастает при многократной смене воды во время кипячения.

Анализ Таблицы 1 выявляет несколько важных закономерностей:

1. Термические методы наиболее эффективны для белковых АПВ (лектинов, ингибиторов протеазы);
2. Ферментация отлично справляется с деградацией АПВ на основе углеводов (фитатов, некоторых олигосахаридов);
3. Комбинированные физические и биологические методы часто превосходят отдельные подходы.

Полученные результаты имеют важное практическое значение как для домашней кулинарии, так и для промышленной переработки бобовых, указывая на то, что оптимизированные многоэтапные подходы позволяют максимизировать питательную ценность и обеспечивать безопасность пищевых продуктов. Данные также подчеркивают, как традиционные методы обработки, разработанные эмпирически на протяжении столетий, теперь подтверждаются современным научным анализом. Будущие исследования должны быть сосредоточены на разработке гибридных последовательностей обработки, которые объединяют наиболее эффективные методы для всестороннего снижения содержания АПВ при сохранении питательной ценности.

## 4. Сравнение эффективности технологий снижения концентрации антипитательных веществ

В Таблице 2 сравниваются основные методы обработки бобовых, такие как замачивание, водно-тепловая обработка, ферментация и проращивание, с точки зрения влияния на снижение содержания АПВ.

Таблица 1. **Наиболее эффективные методы переработки бобовых культур по отношению к основным АПФ**

Table 1. **The most efficient methods of legume processing with respect to the main anti-nutritional factors**

| Антинутриент | Метод технологической обработки | Эффективность | Ссылка |
|---|---|---|---|
| Лектины | Водно-термическая обработка при 100 °C, более 10 минут | > 95 % | [1] |
| Фитаты | Ферментация (натто, темпе) | 60–80 % | [33] |
| Ингибиторы протеаз | Автоклавирование и ферментация с использованием *Bacillus* | 90–95 % | [29] |
| Олигосахариды | Замачивание со сменой воды+ водно-термическая обработка | 50–70 % | [30] |
| Таннины | Удаление семенной оболочки + ферментация | 40–60 % | [31] |
| Оксалаты | Водно-термическая обработка + смена воды | 60–90 % | [32] |

Таблица 2. **Сравнение влияния основных методов обработки бобовых на АПВ**

Table 2. **Comparison of the effect of the main methods of legume processing on the anti-nutrients**

| Антинутриент | Замачивание | Водно-термическая обработка | Ферментация | Проращивание | Ссылка |
|---|---|---|---|---|---|
| Лектины | Минимальный эффект | Высокая эффективность | Частичное сокращение | Минимальный эффект | [2,12,34,35] |
| Фитаты (фитиновая кислота) | Сокращение на 20–50 % при замачивании более 12 часов | Частичное сокращение | Высокая эффективность | Сокращение на 30–60 % | [4, 36–38] |
| Ингибиторы протеаз | Минимальный эффект | Высокая эффективность | Высокая эффективность | Частичное сокращение | [23,39] |
| Таннины | Сокращение на 30–50 % при замачивании со сменой воды | Частичное сокращение | Частичное сокращение | Сокращение на 40–60 % | [36,37,40] |
| Олигосахариды (раффиноза и стахиоза) | Сокращение на 30–50 % при замачивании со сливом воды | Частичное сокращение | Высокая эффективность | Сокращение на 50–70 % | [41,42] |
| Оксалаты | Сокращение на 10–30 % | Сокращение на 30–90 % | Минимальный эффект | Частичное сокращение | [4,40,43] |
| Сапонины | Частичное сокращение при промывке и удалении пены при водно-термической обработке | Частичное сокращение | Минимальный эффект | Частичное сокращение | [1,3,44] |
| Цианогенные гликозиды | Частичное сокращение цианидов | Полное устранение цианидов | Частичное сокращение | Минимальный эффект | [34,45,46] |

В проанализированных литературных источниках раскрываются различные закономерности эффективности различных методов обработки бобовых для снижения количества АПВ, причем каждый метод демонстрирует уникальные преимущества в зависимости от целевого соединения и желаемых результатов в плане питания. Методы термической обработки, в частности кипячение и автоклавирование, демонстрируют высокую эффективность против термолабильных АПВ. Так, было подтверждено, что кипячение чечевицы при 100 °C в течение 30 минут обеспечивает почти полное устранение ингибиторов трипсина (снижение на 90–95 %) при сохранении примерно 80 % термостабильных питательных веществ [2]. Этот метод оказывается особенно ценным для инактивации лектинов и ингибиторов протеазы, поскольку денатурация этих белковых соединений происходит быстро при высоких температурах. Однако длительное время кипячения может поставить под угрозу чувствительные к теплу биоактивные соединения, например, флавоноиды. Исследование термической обработки нута показало 15–20 % потерь этих полезных фитохимических веществ после длительной термической обработки [3].

Ферментация выступает в качестве превосходного биологического подхода к решению проблемы АПВ на основе углеводов, предлагая множество преимуществ по сравнению с чисто физическими методами. Исследования указывают, что традиционные процессы ферментации могут снизить содержание фитатов на 60–80 % за счет активности микробной фитазы, значительно улучшая биодоступность макро и микроэлементов [1]. Микробная трансформация во время ферментации не только разрушает АПВ, но и часто повышает пищевую ценность. Например, на 30 % повышается усвояемость белка и образуются биоактивные пептиды [40]. Для целенаправленного снижения содержания АПВ можно выбрать определенные микробные штаммы, при этом молочнокислые бактерии особенно эффективны против олигосахаридов, а некоторые грибы преуспевают в деградации танинов [41].

Замачивание и проращивание представляют собой промежуточные этапы обработки, которые обеспечивают частичное сокращение АПВ при сохранении питательных качеств. В исследовании убедительно продемонстрировано, что комбинированные протоколы проращивания-ферментации могут достигать синергетических эффектов, при этом прорастание активирует эндогенные ферменты, которые делают АПВ более восприимчивыми к последующей микробной деградации [47].

Исследователи из Автономного Университета Мадрида (AUM) [42] обнаружили, что простое замачивание с удалением воды достигало 50–70 % сокращения раффинозы и сахарозы, в то же время исследователи из Университета сельского хозяйства и технологий в Найроби [43] показали, что растворы для замачивания, усиленные солью, могут дополнительно повысить эту эффективность. Однако исследователи из Чжэцзянского океанического университета [34] предупреждают, что одного замачивания недостаточно для сокращения определенных АПВ, таких как оксалаты, где без последующей термической обработки происходит только 30–40 % сокращение их концентрации.

Сравнительный анализ Таблицы 2 раскрывает несколько ключевых идей об оптимальных стратегиях обработки.

При выборе метода обработки нужно стремиться не только к снижению содержания АПВ, но и к сохранению питательных компонентов и флавоноидов [3]. Современные представления об эффективности процессов ферментации указывают на решающую роль микробных ферментов во взаимодействии с АПВ растительного сырья. Исследователи предполагают, что микроорганизмы продуцируют фитазы и целлюлазы, гидролизующие фитиновую кислоту и олигосахариды.

Белки, являющиеся ингибиторами протеаз, также подвержены влиянию микробных ферментов, особенно интенсивны в этом направлении молочнокислые бактерии [15,47,48]. Известен также метод введения очищенных протеолитических ферментов для индуцированного гидролиза этих соединений [49,50,51]. Кроме того, повышается пищевая ценность частично гидролизованных бобовых белков.

В случае с дубильными веществами исследования указывают на то, что некоторые микроорганизмы могут продуцировать ферменты эстеразы и существенно изменять концентрацию этих соединений [52].

Отдельным малоизученным фактором является использование комбинаций микроорганизмов для ферментации, так как это может вызывать синергические эффекты, более выраженные, чем при использовании монокультур [53]. Спонтанная ферментация с использованием комбинаций микроорганизмов традиционно применялась для производства многих бобовых пищевых продуктов [51], но промышленные решения требуют целенаправленного изучения взаимного влияния микробных групп и субстратов, с которыми они взаимодействуют.

Данные в Таблице 2 показывают, что конкретные группы АПВ могут по-разному подвергаться воздействию термических и ферментативных факторов. Лектины и оксалаты легче всего разрушаются при воздействии высокой температуры. Фитаты и олигосахариды инактивируются и гидролизуются при ферментации. Ингибиторы протеазы и цианогенные гликозиды снижают активность при кипячении и ферментации. Сапонины и танины наиболее устойчивы к внешнему воздействию.

Также результаты исследований указывают на то, что обработка ультразвуком значительно повышает эффективность обработки и питательные качества желтого гороха за счет сокращения времени замачивания, снижения содержания фитиновой кислоты и улучшения усвояемости белка [54]. Применение ультразвуковой технологии ускоряет поглощение воды во время замачивания, сокращая обычное время обработки, при этом эффективно разрушая антипитательные факторы, в частности фитиновую кислоту, которая подавляет усвоение минералов. Кроме того, механическое воздействие ультразвука разрушает матрицу гороха, улучшая доступность и усвояемость белка, что делает ультразвук перспективным методом предварительной обработки для переработки бобовых.

Эти результаты подчеркивают потенциал ультразвука как устойчивого, не термического метода обработки, который может улучшить пищевой профиль растительных белков, сохраняя при этом эффективность производства продуктов питания. Будущие исследования должны изучить масштабируемость этого метода в промышленных условиях, его влияние на другие антипитательные соединения и его влияние на сенсорные и функциональные свойства продуктов, полученных из бобового сырья. Благодаря оптимизации параметров ультразвука эта технология может сыграть ключевую роль в продвижении использования бобовых в высокобелковых пищевых продуктах, способствуя более устойчивым и питательным растительным диетам.

## 5. Заключение

Гидротермическое воздействие и ферментация оказывают положительный эффект на устранение АПВ и сохранение питательной ценности, делая бобовые более пригодными для промышленного применения и создания инновационных продуктов питания. Ферментация улучшает сенсорные и функциональные свойства продуктов на основе бобовых и повышает биодоступность железа, цинка и белка, способствует образованию полезных метаболитов, таких как короткоцепочечные жирные кислоты, посредством микробной активности.

Ферментация оказывает наиболее существенное влияние на снижение содержания фитатов и ингибиторов протеазы.

Для максимального эффекта целесообразно сочетание нескольких методов технологической обработки бобовых перед употреблением, таких как замачивание, автоклавирование, или обычная водно-термическая обработка с удалением воды и пены и последующей ферментацией продукта. Такой подход позволит минимизировать содержание АПВ.

Результаты этого обзора подчеркивают преобразующий потенциал ферментации в оптимизации продуктов на основе бобовых. Это соответствует растущему спросу на функциональные продукты из растительного сырья, поддерживающие здоровье кишечника, метаболические функции и способствующие профилактике хронических заболеваний.

Проблемы, связанные с ферментацией бобовых, включают необходимость изучения синергетических эффектов ферментации с использованием нескольких штаммов микроорганизмов и генетического отбора микроорганизмов для усиления деградации АПВ. Кроме того, требуются долгосрочные исследования для подтверждения влияния ферментированных бобовых на здоровье человека, в частности на микробиоту кишечника и показатели хронических заболеваний.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / REFERENCES


1. Kahala, M., Mäkinen, S., Pihlanto, A. (2021). Impact of fermentation on antinutritional factors. Chapter in a book: Bioactive Compounds in Fermented Foods. CRC Press, 2021. https://doi.org/10.1201/9780429027413-10
2. Gandhi, H., Toor, B. S., Kaur, A., Kaur, J. (2022). Effect of processing treatments on physicochemical, functional, and thermal characteristics of lentils (Lens culinaris). *Journal of Food Measurement and Characterization*, 16(6), 4603–4614. https://doi.org/10.1007/s11694-022-01549-1
3. Milán-Noris, A. K., Gutierrez-Uribe, J. A., Serna-Saldivar, S. O. (2023). Influence of soaking and boiling on flavonoids and saponins of nine desi chickpea cultivars with potential antiproliferative effects. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 17(4), 3473–3481. https://doi.org/10.1007/s11694-023-01861-4
4. Anaemene, D., Fadupin, G. (2022). Anti-nutrient reduction and nutrient retention capacity of fermentation, germination, and combined germination-fermentation in legume processing. *Applied Food Research*, 2(1), Article 100059. https://doi.org/10.1016/j.afres.2022.100059
5. Ojo M. A. (2022). Tannins in foods: Nutritional implications and processing effects of hydrothermal techniques on underutilized hard-to-cook legume seeds — a review. *Preventive Nutrition and Food Science,* 27(1), 14–19. https://doi.org/10.3746/pnf.2022.27.1.14
6. Badjona, A., Bradshaw, R., Millman, C., Howarth, M., Dubey, B. (2023). Faba bean processing: Thermal and non-thermal processing on chemical, antinutritional factors, and pharmacological properties. *Molecules*, 28(14), Article 5431. https://doi.org/10.3390/molecules28145431
7. Zheng, Q., Wang, F., Nie, C., Zhang, K., Sun, Y., AL-Ansi, W. et al (2024). Elevating the significance of legume intake: A novel strategy to counter aging-related mitochondrial dysfunction and physical decline. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 23(3), Article 13342. https://doi.org/10.1111/1541-4337.13342
8. Tan, Y., Tam, C. C., Meng, S., Zhang, Y., Alves, P., Yokoyama, W. (2021). Cooked black turtle beans ameliorate insulin resistance and restore gut microbiota in C57BL/6J mice on high-fat diets. *Foods*, 10(8), Article 1691. https://doi.org/10.3390/foods10081691
9. Patel, L., La Vecchia, C., Negri, E., Mignozzi, S., Augustin, L. S., Levi, F. et al (2024). Legume intake and cancer risk in a network of case-control studies. *European Journal of Clinical Nutrition*, 78(5), 391–400. https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2398023/v1
10. Chamberlin, M. L., Wilson, S. M. G., Gaston, M. E., Kuo, W. -Y., Miles, M. P. (2024). Twelve weeks of daily lentil consumption improves fasting cholesterol and postprandial glucose and inflammatory responses — A randomized clinical trial. *Nutrients*, 16(3), Article 419. https://doi.org/10.3390/nu16030419
11. Sharma, N., Sahu, J. K., Joshi, S., Khubber, S., Bansal, V., Bhardwaj, A. et al. Bal, L. M. (2022). Modulation of lentil antinutritional properties using non-thermal mediated processing techniques — A review. *Journal of Food Composition and Analysis*, 109, Article 104498. https://doi.org/10.1016/j.jfca.2022.104498
12. Adamcová A., Laursen K. H., Ballin N. Z. (2021). Lectin activity in commonly consumed plant-based foods: Calling for method harmonization and risk assessment. *Foods*, 10(11), Article 2796. https://doi.org/10.3390/foods10112796
13. Dangi, P., Chaudhary, N., Gajwani, D., Neha (2021). Antinutritional factors in legumes. Chapter in a book: Handbook of Cereals, Pulses, Roots, and Tubers. CRC Press, 2021.
14. Sun, X., Ma, L., Xuan, Y., Liang, J. (2024). Degradation of anti-nutritional factors in maize gluten feed by fermentation with bacillus subtilis: A focused study on optimizing fermentation conditions. *Fermentation*, 10(11), Article 555. https://doi.org/10.3390/fermentation10110555
15. Christensen, L. F., García-Béjar, B., Bang-Berthelsen, C. H., Hansen, E. B. (2022). Extracellular microbial proteases with specificity for plant proteins in food fermentation. *International Journal of Food Microbiology*, 381, Article 109889. https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2022.109889
16. Gautam, G., Gänzle, M. G. (2023). Conversion of (poly)phenolic compounds in food fermentations by lactic acid bacteria: Novel insights into metabolic pathways and functional metabolites. *Current Research in Food Science*, 6, Article 100448. https://doi.org/10.1016/j.crfs.2023.100448
17. Abu Hafsa S. H., Hassan, A. A., Elghandour, M. M. M. Y., Barbabosa-Pliego, A., Mellado, M., Salem, A. Z. M. (2022). Dietary anti-nutritional factors and their roles in livestock nutrition. Chapter in a book: Sustainable Agriculture Reviews. Springer, Cham, 2022. http://doi.org/10.1007/978-3-031-07496-7_4
18. Kumar, A., Dash, G. K., Sahoo, S. K., Lal, M. K., Sahoo, U., Sah, R. P. et al. (2023). Phytic acid: A reservoir of phosphorus in seeds plays a dynamic role in plant and animal metabolism. *Phytochemistry Reviews*, 22(5), 1281–1304. https://doi.org/10.1007/s11101-023-09868-x
19. Marcos-Méndez D. A, Canseco-Nava, H., Oliart-Ros, R. M., Ramírez-Higuera, A. (2021). Presence of antinutritional factors in legumes. *Journal of Innovative Engineering / Revista de Ingenieria Innovativa*, 5(17), 6–13. https://doi.org/10.35429/JOIE.2021.17.5.6.13
20. Avila-Nava, A., Medina-Vera, I., Rodríguez-Hernández, P., Guevara-Cruz, M., Canton, P. K. H. G., Tovar, A. R. et al. (2021). Oxalate content and antioxidant activity of different ethnic foods. *Journal of Renal Nutrition*, 31(1), 73–79. https://doi.org/10.1053/j.jrn.2020.04.006
21. Salgado, N., Silva, M. A., Figueira, M. E., Costa, H. S., Albuquerque, T. G. (2023). Oxalate in foods: Extraction conditions, analytical methods, occurrence, and health implications. *Foods*, 12(17), Article 3201. https://doi.org/10.3390/foods12173201
22. Boschin, G., Tesio, E., Arnoldi, A. (2022). A field case of pig poisoning by accidental feed contamination by alkaloid-rich lupin seeds. *Journal of Applied Animal Research*, 50(1), 725–731. https://doi.org/10.1080/09712119.2022.2147181
23. Das, G., Sharma, A., Sarkar, P. K. (2022). Conventional and emerging processing techniques for the post-harvest reduction of antinutrients in edible legumes. *Applied Food Research*, 2(1), Article 100112. https://doi.org/10.1016/j.afres.2022.100112
24. Bloot, A. P. M., Kalschne, D. L., Amaral, J. A. S., Baraldi, I. J., Canan, C. (2021). A review of phytic acid sources, obtention, and applications. *Food Reviews International*, 39(1), 73–92. https://doi.org/10.1080/87559129.2021.1906697
25. Fu, Z., Akula, S., Thorpe, M., Hellman, L. (2021). Marked difference in efficiency of the digestive enzymes pepsin, trypsin, chymotrypsin, and pancreatic elastase to cleave tightly folded proteins. *Biological Chemistry*, 402(7), 861–867. https://doi.org/10.1515/hsz-2020-0386
26. Chauhan, D., Kumar, K., Ahmed, N., Thakur, P., Rizvi, Q. U. E. H., Jan, S. et al. (2022). Impact of soaking, germination, fermentation, and roasting treatments on nutritional, anti-nutritional, and bioactive composition of black soybean (*Glycine max* L.). *Journal of Applied Biology and Biotechnology,* 10(5), 186–192. https://doi.org/10.5039/agraria.v18i4a3313
27. Zhu, X., Liu, J., Yang, G. (2021). Effects of soybean oligosaccharide, stachyose, and raffinose on growth performance and cecal microbiota in broiler chickens. *Animal Science Journal*, 92(1), Article e13668. https://doi.org/10.1111/asj.13668
28. Emkani, M., Oliete, B., Saurel, R. (2022). Effect of lactic acid fermentation on legume protein properties, a review. *Fermentation*, 8(6), Article 244. https://doi.org/10.3390/fermentation8060244
29. Cao, Y., Xu, M., Lu, J., Cai, G. (2023). Simultaneous microbial fermentation and enzymolysis: A biotechnology strategy to improve the nutritional and functional quality of soybean meal. *Food Reviews International*, 40(5), 1296–1311. https://doi.org/10.1080/87559129.2023.2212048
30. Pedrosa, M. M., Guillamón, E., Arribas, C. (2021). Autoclaved and extruded legumes as a source of bioactive phytochemicals: A review. *Foods*, 10(2), Article 379. https://doi.org/10.3390/foods10020379
31. Chisowa, D. M. (2022). Comparative evaluation of the effect of boiling and autoclaving of legume grains on tannin concentration. *Magna Scientia Advanced Biology and Pharmacy*, 7(1), 009–017. https://doi.org/0.30574/msabp.2022.7.1.0080
32. Ghanati, K., Oskoei, V., Rezvani-Ghalhari, M., Shavali-Gilani, P., Mirzaei, G., Sadighara, P. (2024). Oxalate in plants, amount, and methods to reduce exposure, a systematic review. *Toxin Reviews*, 43(3), 411–422. https://doi.org/10.1080/15569543.2024.2344493
33. Sun, X., Ma, L., Xuan, Y., Liang, J. (2024). Degradation of anti-nutritional factors in maize gluten feed by fermentation with bacillus subtilis: A focused study on optimizing fermentation conditions. *Fermentation*, 10(11), Article 555. https://doi.org/10.3390/fermentation10110555
34. Ampofo, J., Abbey, L. (2023). Sprouted legumes: Biochemical changes, nutritional impacts, and food safety concerns. Chapter in a book: Advances in Plant Sprouts. Springer, Cham, 2023. https://doi.org/10.1007/978-3-031-40916-5_7
35. Manzoor, M., Singh, D., Aseri, G. K., Sohal, J. S., Vij, S., Sharma, D. (2021). Role of lacto-fermentation in reduction of antinutrients in plant-based foods. *Journal of Applied Biology and Biotechnology*, 9(3), 7–16. https://doi.org/10.7324/JABB.2021.9302
36. Nagessa, W. B., Chambal, B., Macuamule, C. (2023). Effects of processing methods on phytate and tannin content of black small common beans (*Phaseolus vulgaris* L.) cultivated in Mozambique. *Cogent Food and Agriculture*, 9(2), Article 2289713. https://doi.org/10.1080/23311932.2023.2289713
37. Elliott, H., Woods, P., Green, B. D., Nugent, A. P. (2022). Can sprouting reduce phytate and improve the nutritional composition and nutrient bioaccessibility in cereals and legumes. *Nutrition Bulletin*, 47(2), 138–156. https://doi.org/10.1111/nbu.12549
38. Ghaffar, F., Mehmood, Z., Khurshid, H., Sana, R. (2025). Influence of wet processing techniques (soaking, boiling, and pressure cooking) on phytic acid reduction, mineral retention, and solubility in common beans Phaseolus Vulgaris L, Vigna Unguiculata, Vigna Radiata, and Cicer Arietinum L. *Indus Journal of Bioscience Research*, 3(4), 782–793. https://doi.org/10.70749/ijbr.v3i4.1168
39. Arbab Sakandar, H., Chen, Y., Peng, C., Chen, X., Imran, M., Zhang, H. (2023). Impact of fermentation on antinutritional factors and protein degradation of legume seeds: A review. *Food Reviews International*, 39(3), 1227–1249. https://doi.org/10.1080/87559129.2021.1931300
40. Jeyakumar, E., Lawrence, R. (2022). Microbial fermentation for reduction of antinutritional factors. Chapter in a book: Current Developments in Biotechnology and Bioengineering. Elsevier, 2021. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823506-5.00012-6
41. Tasneem, F., Shradha, S., Arunraj, R., (2025). Traditional methods of soaking or sprouting pulses reduce the flatulence causing raffinose family alpha-galactosidase in regularly used nutritious edible legumes. *Indian Journal of Traditional Knowledge*, 24(3), 253–257. https://doi.org/10.56042/ijtk.v24i3.11017
42. Kitum, V. C., Kinyanjui, P. K., Mathara, J. M., Sila, D. N. (2022). Oligosaccharide and antinutrient content of whole red haricot bean fermented in salt–sugar and salt-only solutions. *Legume Science*, 4(2), Article e110. https://doi.org/10.1002/leg3.110
43. Huynh, N. K., Nguyen, D. H., Nguyen, H. V. (2022). Effects of processing on oxalate contents in plant foods: A review. *Journal of Food Composition and Analysis*, 112, Article 104685. https://doi.org/10.1016/j.jfca.2022.104685
44. Mustafa, A. M., Abouelenein, D., Acquaticci, L., Alessandroni, L., Angeloni, S., Borsetta, G. et al. (2022). Polyphenols, saponins and phytosterols in lentils and their health benefits: An overview. *Pharmaceuticals*, 15(10), Article 1225. https://doi.org/10.3390/ph15101225
45. Ramli, N. A. M., Chen, Y. H., Zin, Z. M., Abdullah, M. A. A., Rusli, N. D., Zainol, M. K. (March 9, 2021). *Effect of soaking time and fermentation on the nutrient and antinutrients composition of Canavalia ensiformis (Kacang Koro)*. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 3rd Asia Pacific Regional Conference on Food Security (ARCoFS2021), Kelantan, Malaysia. IOP Publishing Ltd, 2021. https://doi.org/10.1088/1755-1315/756/1/012033
46. Anjum, N., Sheikh, M. A., Saini, C. S., Hameed, F., Sharma, H. K., Bhat, A. (2022). Cyanogenic glycosides. Chapter in a book: Handbook of plant and animal toxins in food. CRC Press, 2022. https://doi.org/10.1201/9781003178446
47. Adamcová, A., Laursen, K. H., Ballin, N. Z., (2021). Lectin activity in commonly consumed plant-based foods: Calling for method harmonization and risk assessment. *Foods,* 10(11), Article 2796. https://doi.org/10.3390/foods10112796
48. Du, Q., Li, H., Tu, M., Wu, Z., Zhang, T., Liu, J. et al. (2024). Legume protein fermented by lactic acid bacteria: Specific enzymatic hydrolysis, protein

composition, structure, and functional properties. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 238, Article 113929. https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2024.113929
49. Manus, J., Millette, M., Uscanga, B. R. A., Salmieri, S., Maherani, B., Lacroix, M. (2021). In vitro protein digestibility and physico-chemical properties of lactic acid bacteria fermented beverages enriched with plant proteins. *Journal of Food Science*, 86(9), 4172–4182. https://doi.org/10.1111/1750-3841.15859
50. Verni, M., Demarinis, C., Rizzello, C. G., Baruzzi, F. (2020). Design and characterization of a novel fermented beverage from lentil grains. *Foods*, 9(7), Article 893. https://doi.org/10.3390/foods9070893
51. Verni, M., Pontonio, E., Montemurro, M., Giuseppe Rizzello, C. (2022). Fermentation as strategy for improving nutritional, functional, technological, and sensory properties of legumes. Chapter in a book: Legumes Research-Volume 2. IntechOpen, 2022. https:// doi.org/10.5772/intechopen.102523
52. Gaur, G., Gänzle, M. G. (2023). Conversion of (poly)phenolic compounds in food fermentations by lactic acid bacteria: Novel insights into metabolic pathways and functional metabolites. *Current Research in Food Science*, 6, Article 100448, https://doi.org/10.1016/j.crfs.2023.100448
53. Garrido-Galand, S., Asensio-Grau, A., Calvo-Lerma, J., Heredia, A., Andrés, A. (2021). The potential of fermentation on nutritional and technological improvement of cereal and legume flours: A review. *Food Research International*, 145, Article 110398. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2021.110398
54. Tawalbeh, D., Ahmad, W. W., Sarbon, N. M. (2023). Effect of ultrasound pretreatment on the functional and bioactive properties of legumes protein hydrolysates and peptides: A comprehensive review. *Food Reviews International*, 39(8), 5423–5445. https://doi.org/10.1080/87559129.2022.2069258


| СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ | AUTHOR INFORMATION |
|---|---|
| **Принадлежность к организации** | **Affiliation** |
| **Ким Анастасия Абдумаликовна** — аспирант, инженер, Факультет биотехнологий, Университет ИТМО<br>197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр-т, 49<br>E-mail: kim-anastasia@bk.ru<br>ORCID: https://orcid.org/0009-0007-7493-1755<br>* автор для контактов | **Anastasia A. Kim**, Graduate Student, Faculty of Biotechnologies, ITMO University<br>49, Kronverksky Ave, Saint Petersburg, 197101, Russia<br>E-mail: kim-anastasia@bk.ru<br>ORCID: https://orcid.org/0009-0007-7493-1755<br>* corresponding author |
| **Баланов Петр Евгеньевич** — кандидат технических наук, доцент, Факультет биотехнологий, Университет ИТМО<br>197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр-т, 49<br>E-mail: balanov@itmo.ru<br>ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0610-9248 | **Petr E. Balanov**, Candidate of Technical Sciences, Docent, Faculty of Biotechnologies, ITMO University<br>49, Kronverksky Ave, Saint Petersburg, 197101, Russia<br>E-mail: balanov@itmo.ru<br>ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0610-9248 |
| **Смотраева Ирина Владимировна** — кандидат технических наук, доцент, Факультет биотехнологий, Университет ИТМО<br>197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр-т, 49<br>E-mail: smotraeva@itmo.ru<br>ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1255-832X | **Irina V. Smotraeva**, Candidate of Technical Sciences, Docent, Faculty of Biotechnologies, ITMO University,<br>49, Kronverksky Ave, Saint Petersburg, 197101, Russia<br>E-mail: smotraeva@itmo.ru<br>ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1255-832X |
| **Критерии авторства** | **Contribution** |
| Авторы в равных долях имеют отношение к написанию рукописи и одинаково несут ответственность за плагиат. | The author has the sole responsibility for writing the manuscript and is 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/10.21323/2618-9771-2025-8-3-407-413

Received 12.05.2025
Accepted in revised 19.09.2025
Accepted for publication 24.09.2025
© Ammar A. S. M., Riyad Y. M., Younis M. I., Ali M. R., 2025
Available online at https://www.fsjour.com/jour
Review article
Open access

# VALORIZATION OF CITRUS FRUIT WASTES: SUSTAINABLE EXTRACTION OF BIOACTIVE COMPOUNDS FOR FOOD AND HEALTH APPLICATIONS

Abdalla S. M. Ammar, Youssef M. Riyad, Mohamed I. Younis, Marwa R. Ali*
Food Science Department, Faculty of Agriculture, Cairo University, Giza, Egypt

*KEY WORDS:*
*citrus waste, bioactive compounds, green extraction, sustainable processing, flavonoids, pectin, circular economy*

ABSTRACT
Globally grown and handled citrus fruits produce a lot of by-products, including pulp, seeds, and peels. Often considered agro-industrial waste, rich in significant bioactives such as flavonoids, phenolic acids, limonoids, pectin, and essential oils, these materials are now considered attractive sustainable sources. This review explores recent developments in green extraction techniques, including ultrasonic-assisted, microwave-assisted, enzyme-assisted, supercritical fluid, pressurized liquid extraction, and natural deep eutectic solvents. Key parameters like solvent type, temperature, duration, and particle size are evaluated for their influence on yield and quality. Green methods provide better selectivity, scalability, and environmental benefits than traditional approaches. Citrus-derived compounds have promise in antimicrobial packaging and cosmetics beyond their application as nutritional supplements and food preservatives. Combining intelligent optimization techniques with circular biorefinery designs indicates a bright future for citrus waste valorization. The review emphasizes the change toward environmentally friendly technology for sustained value recovery despite difficulties in cost and regulation.

**Поступила 12.05.2025**
**Поступила после рецензирования 19.09.2025**
**Принята в печать 24.09.2025**
© Аммар А. С.М., Рияд Ю. М., Юнис М. И., Али М. Р., 2025
**https://www.fsjour.com/jour**
**Обзорная статья**
**Open access**

# ВАЛОРИЗАЦИЯ ОТХОДОВ ПЕРЕРАБОТКИ ПЛОДОВ ЦИТРУСОВЫХ: ЭКОЛОГИЧНАЯ ЭКСТРАКЦИЯ БИОАКТИВНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТАХ И УЛУЧШЕНИЯ ЗДОРОВЬЯ

Аммар А. С. М., Рияд Ю. М., Юнис М. И., Али М. Р.*
Кафедра науки о питании, Сельскохозяйственный университет, Каирский университет, Гиза, Египет

*КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:*
*отходы цитрусовых, биоактивные соединения, «зелёная» экстракция, экологичная переработка, флавоноиды, пектин, экономика замкнутого цикла*

АННОТАЦИЯ
Во всем мире в результате выращивания и переработки плодов цитрусовых образуется большое количество побочных продуктов, таких как мякоть, семена и кожура. Зачастую рассматриваемые как отходы агро-промышленного производства, эти материалы, богатые важными биоактивными веществами, такими как флавоноиды, фенольные кислоты, пектин, лимоноиды, эфирные масла, в настоящее время считаются привлекательными экологичными источниками. В данном обзоре рассмотрены современные достижения в «зелёных» технологиях экстракции, включая ультразвуковую, микроволновую, ферментативную, суперкритическую флюидную экстракцию, жидкостную экстракцию под давлением, а также натуральные глубокие эвтектические растворители. Проведена оценка ключевых параметров, таких как тип растворителя, температура, продолжительность и размер частиц. «Зелёные» методы обеспечивают лучшей селективностью, масштабируемостью и пользой для окружающей среды по сравнению с традиционными подходами. Полученные из цитрусовых соединения обладают потенциалом применения в антимикробной упаковке и косметических средствах помимо их применения в качестве пищевых добавок и консервантов пищевых продуктов. Комбинирование интеллектуальных методов со схемами биопереработки замкнутого цикла означает светлое будущее для валоризации отходов переработки цитрусовых. Данный обзор сфокусирован на изменениях в направлении экологически безопасной технологии для устойчивого извлечения ценности несмотря на затруднения, связанные с затратами и законодательством.

## 1. Introduction

Citrus fruits (*Rutaceae family*) rank among the world's largest fruit crops, with over 150 million tons produced annually [1]. Among the citrus fruits, the world production of oranges was estimated at 69845563.99 tons in 2023, and the production of oranges in Egypt was around 3700000 tons in 2023 [2]. Large-scale juice and food processing of citrus (i. e., orange: *Citrus sinensis*, lemon: *Citrus limon*, lime: *Citrus aurantiifolia*, mandarin: *Citrus reticulate*, and grapefruit: *Citrus paradise*) yields a significant amount of waste (peels, pulp, and seeds) — roughly 40–50% of the fruit — amounting to tens of millions of tons of residual biomass every year [3]. Disposal of these citrus by-products poses environmental challenges, as much of it is still landfilled or incinerated, contributing to pollution and resource loss [4]. Yet, these so-called "wastes" are rich in valuable bioactive compounds, including flavonoids, other phenolic compounds, limonoids, pectin, and essential oils [3]. This realization has spurred growing interest in valorizing citrus processing residues as sustainable sources of high-value bioactives instead of treating them as environmental burdens [5].

Recovering bioactives from citrus wastes mitigates disposal problems and creates new opportunities in the food and healthcare sectors. Studies show that citrus peels and other byproducts have potent antioxidants and antibacterial agents that could be helpful to additives and natural food preservatives [6]. Likewise, phytochemicals derived from citrus wastes (e. g., polyphenols and limonoids) show several health-promoting qualities, including antioxidant, anti-inflammatory, cardioprotective, and anti-cancer activities — thereby supporting their possible usage in nutraceuticals and drugs [7]. Green extraction processes will become sustainable substitutes for conventional solvent-based approaches if we maximize these advantages in an environmentally acceptable manner. With minimal solvent and energy required, approaches include ultrasonic-assisted extraction (UAE), microwave-assisted extraction

FOR CITATION: **Ammar, A. S. M., Riyad, Y. M., Younis, M. I., Ali, M. R.** (2025). Valorization of citrus fruit wastes: Sustainable extraction of bioactive compounds for food and health applications. *Food Systems,* 8(3), 407–413. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-3-407-413

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: **Аммар, А. С. М., Рияд, Ю. М., Юнис, М. И., Али, М. Р.** (2025). Валоризация отходов переработки плодов цитрусовых: экологичная экстракция биоактивных соединений для применения в пищевых продуктах и улучшения здоровья. *Пищевые системы*, 8(3), 407–413. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-3-407-413

(MAE), and supercritical fluid extraction (SFE), which effectively recovers citrus bioactives [8]. Natural deep eutectic solvents (NADES) have lately attracted interest as green extraction medium since they provide high efficiency, cost-effectiveness, biodegradability, and adjustable characteristics for bioactive recovery [9]. Using these creative, greener extraction techniques for citrus fruit wastes helps to convert agro-industrial waste into value-added goods for food preservation and medical uses, therefore illustrating a circular economy approach to agricultural byproducts.

Growing environmental awareness and legal limits on using dangerous solvents in the food and pharmaceutical sectors are pushing the shift toward green extraction techniques. Conventional extraction techniques can depend on organic solvents, including methanol, chloroform, or hexane, which produce large amounts of chemical waste and are poisonous and combustible [10]. On the other hand, green extraction technologies concentrate on lower energy inputs, safer solvents, less waste, and improved efficiency, and line up with the ideas of green chemistry [11]. For shorter timeframes and lower temperatures, ultrasonic-assisted extraction (UAE) breaks plant cell walls using acoustic cavitation, releasing internal chemicals. Analogous mass transfer acceleration and bioactive yield enhancement in microwave-assisted extraction (MAE) depend on dielectric heating. These creative approaches have environmental benefits and improved compound selectivity, repeatability, and scalability of extraction performance [12].

By encouraging waste reduction, responsible consumption, and clean production, the valorization of citrus waste via green extraction also helps the Sustainable Development Goals (SDGs). There is an excellent opportunity to incorporate citrus-derived bioactives into edible films, nutritional supplements, drinks, and medicinal formulations, as clean-label and functional food products become increasingly in demand. For low-sugar jams and probiotic yogurts, pectin derived from citrus peels can function as a prebiotic or gelling agent; meanwhile, limonene-rich essential oils are under investigation as natural antibacterial packaging. Beyond food applications, citrus flavonoids such as hesperidin, naringin, and rutin have demonstrated strong anti-inflammatory and antioxidant properties, which may help manage chronic conditions like cardiovascular disease and metabolic syndrome. Thus, applying green technologies to extract these compounds reduces environmental impact and adds economic value to citrus-processing industries by opening new avenues in health-focused innovation. Therefore, this review aims to provide a comprehensive and up-to-date overview of the bioactive compounds in citrus fruit wastes and critically evaluate the recent advancements in green extraction technologies for their sustainable recovery (Figure 1). Emphasis is placed on the efficiency, environmental benefits, and application potential of these techniques in the food, pharmaceutical, and nutraceutical industries, thereby supporting the valorization of citrus by-products within a circular economy framework.

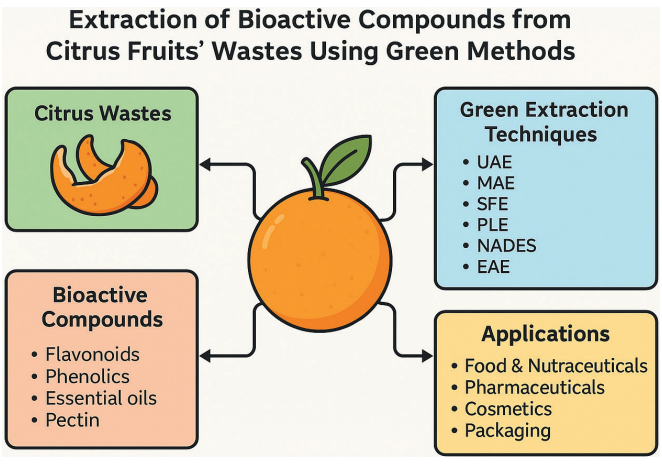



Figure 1. **Conceptual framework for the green extraction of bioactive compounds from citrus fruits' wastes and their applications**

Рисунок 1. **Концептуальная структура для «зелёной» экстракции биоактивных соединений из отходов переработки плодов цитрусовых и их применения**

## 2. Objects and methods

This review was conducted to critically examine recent progress in the valorization of citrus fruit waste, with a focus on sustainable green extraction methods and their potential applications in the food and health sectors. The search for and selection of literature were performed systematically to ensure transparency and reproducibility.

### *2.1. Literature search strategy*

Relevant peer-reviewed articles were retrieved from databases including Scopus, Web of Science, PubMed, and Google Scholar. The search was limited to the period 2018–2023 to capture the most recent developments. Search strings combined keywords such as citrus waste, citrus peel, bioactive compounds, flavonoids, pectin, essential oils, green extraction, ultrasound-assisted extraction, microwave-assisted extraction, enzyme-assisted extraction, supercritical fluid extraction, natural deep eutectic solvents, sustainability, and circular economy. An initial pool of approximately 250 records was retrieved. After screening for relevance and applying inclusion/exclusion criteria, around 85 studies were included for detailed analysis. Reference lists of key publications were also screened to identify additional sources.

### *2.2. Inclusion and exclusion criteria*

Articles were included if they: (i) addressed citrus fruit by-products (peels, pulp, or seeds) as primary raw material; (ii) reported bioactive compound identification, extraction, or application; (iii) emphasized green, sustainable, or non-conventional extraction approaches; and (iv) were peer-reviewed original research, reviews, or book chapters published in English. Studies were excluded if they: (i) focused exclusively on conventional solvent extraction without sustainability aspects, (ii) were conference abstracts lacking sufficient detail, or (iii) dealt with unrelated fruit by-products.

### *2.3. Data sources and geographic scope*

The review encompassed studies conducted in diverse regions, including the Mediterranean basin (Egypt, Spain, Italy, Greece), South and East Asia (China, India), Latin America (Brazil, Mexico), and the United States. This ensured coverage of a wide range of cultivars, climatic conditions, and industrial practices.

### *2.4. Research subjects and analytical techniques*

The primary focus was on citrus peels, pulp, and seeds, with an emphasis on the occurrence of flavonoids, phenolic acids, limonoids, carotenoids, pectin, and essential oils. The analytical methods reported in the reviewed studies included HPLC, GC–MS, spectrophotometry, and antioxidant assays, which are widely applied for compound identification, quantification, and functional evaluation. A comparative assessment of extraction yields, solvent systems, and bioactive functionalities was synthesized to highlight trends.

### *2.5. Review process and limitations*

From an initial pool of records retrieved, a few articles satisfied the inclusion criteria and underwent a comprehensive review. We looked through the reference lists of essential papers to find more sources that were useful. The results were organized into sections based on themes. These themes included the composition of citrus waste, green extraction techniques, factors that affect them, a comparison with traditional methods, applications, and prospects.

## 3. Composition of citrus wastes

Citrus processing generates substantial by-products, primarily composed of peels, pulp, and seeds, accounting for nearly 50% of the total fruit mass. These waste fractions are particularly rich in a wide range of bioactive compounds (Table 1), including flavonoids (e. g., hesperidin, naringin, rutin), phenolic acids, limonoids, carotenoids, and essential oils such as limonene and linalool. Among them, citrus peels are the most valuable due to their high concentration of secondary metabolites and functional macromolecules. For example, orange and mandarin peels are known to contain significant levels of hesperidin and narirutin, whereas lemon and lime peels are richer in eriocitrin and naringin. The pulp and albedo fractions contribute additional pectin, soluble fibers, and residual polyphenols, while citrus seeds often provide lipophilic compounds like tocopherols and sterols along with protein and fatty acids.

The phytochemical profile of citrus wastes varies by tissue type and species, cultivar, maturity stage, and geographical origin. For instance, grapefruit peels have been shown to exhibit higher total flavonoid content than sweet orange peels, while lemon peels typically contain more limonene in their essential oil fraction. Moreover, citrus peels are a particularly abundant source of pectin, with concentrations ranging between 20–35% on a dry weight basis, depending on extraction conditions and fruit type. This makes citrus waste an excellent raw material for producing biodegradable food packaging and pharmaceutical carriers. Additionally, peels and albedo's insoluble dietary fiber content supports gut health and has prebiotic potential. Understanding the chemical composition of citrus wastes is essential for selecting appropriate extraction methods and guiding their valorization into functional food and nutraceutical products.

Table 1. **Summary of bioactive compounds in citrus wastes and their health effects**

Таблица 1. **Краткая информация о биоактивных соединениях в отходах переработки цитрусовых и их влияние на здоровье**

| Bioactive compound | Citrus waste source | Major citrus type(s) | Health effects | References |
|---|---|---|---|---|
| **Hesperidin** | Peel, albedo | Orange, mandarin | Antioxidant, anti-inflammatory, vasoprotective | [7] |
| **Naringin** | Peel, albedo | Grapefruit, lime | Antioxidant, anti-obesity, neuroprotective | [13] |
| **Eriocitrin** | Peel | Lemon | Antioxidant, anti-diabetic, anti-inflammatory | [14] |
| **Limonene** | Essential oil in peel | Orange, lemon, lime | Antimicrobial, anti-cancer, anxiolytic | [15] |
| **Pectin** | Peel, pulp | Sweet lime, orange | Prebiotic, blood sugar regulation, gut health | [16] |
| **Phenolic acids** | Peel, pulp | Orange, lemon | Antioxidant, anti-inflammatory | [17] |
| **Carotenoids** | Peel, albedo | Orange, mandarin | Antioxidant, provitamin A, skin and eye health | [18] |
| **Dietary fibers** | Peel, pulp | All citrus types | Gut microbiota modulation, cholesterol-lowering | [19] |
| **Limonoids** | Seeds, peel | Orange, grapefruit | Anti-cancer, liver detox enzyme modulation | [20] |

## 4. Green extraction techniques

The valorization of citrus processing wastes through green extraction methods has gained traction as an eco-conscious solution that meets both industrial and environmental demands. These techniques aim to efficiently isolate bioactive compounds while minimizing solvent toxicity, energy consumption, and waste generation. Below, each method is discussed in detail in the context of citrus waste utilization.

### *4.1. Ultrasound-assisted extraction (UAE)*

Ultrasound-assisted extraction (UAE) is a promising green technique that uses high-frequency sound waves to create acoustic cavitation. This phenomenon involves the rapid formation and collapse of microscopic bubbles in the solvent, which generates intense mechanical forces that disrupt plant cell walls and enhance the release of intracellular bioactive compounds. UAE has been effectively applied to citrus wastes, particularly peels, to extract flavonoids, phenolic acids, and essential oils. For instance, Manzur et al. [21] demonstrated that the UAE of *Citrus latifolia* waste yielded high levels of total phenolics suitable for developing bioactive delivery systems. The method offers several benefits, including improved mass transfer, reduced solvent usage, and shorter extraction times. To guarantee commercial practicality, issues such as the deterioration of heat-sensitive compounds at high intensities and the difficulty of scale-up resulting from non-uniform energy dispersion must be resolved.

### *4.2. Microwave-assisted extraction (MAE)*

Microwave-assisted extraction (MAE) rapidly heats polar molecules within plant tissues using microwave radiation, triggering cell rupture and enabling the release of target compounds into the extraction solution. Specially fit for time- and energy-efficient extractions, this dielectric heating technique speeds solvent penetration and solubilization of bioactives. MAE has shown great promise in citrus waste valorization. Kumar et al. [22] utilized MAE to extract high-quality pectin from *Citrus limetta* peel waste, achieving high yields and preserving its functional properties. MAE is particularly advantageous for its rapid operation, high energy efficiency, and compatibility with various green solvents. However, it is limited by issues such as the risk of local overheating (hot spots) and poor penetration depth, which can complicate scale-up in industrial settings.

### *4.3. Supercritical fluid extraction (SFE)*

Supercritical fluid extraction (SFE) utilizes fluids (most commonly carbon dioxide ($CO_2$)) above their critical temperature and pressure, where they exhibit both gas-like diffusivity and liquid-like solvating power. In this supercritical state, $CO_2$ is particularly effective for extracting non-polar bioactives such as limonene and other essential oils from citrus peels. Granone et al. [23] demonstrated that SFE can efficiently recover aroma-rich limonene from orange and lemon peels without leaving toxic residues, making it highly suitable for food, cosmetic, and pharmaceutical applications. SFE is advantageous due to its selectivity, solvent-free nature, and recyclability. However, the high equipment cost and limited effectiveness for polar compounds, unless co-solvents are used, can restrict its broader application in extracting diverse citrus bioactives.

### *4.4. Pressurized liquid extraction (PLE)*

Pressurized liquid extraction (PLE), or accelerated solvent extraction (ASE), operates by applying high pressure and temperature to maintain solvents in a liquid state above their boiling points. This enhances their ability to penetrate plant matrices and dissolve target compounds. Although less explored than UAE or MAE in the context of citrus waste, PLE has been effectively used to extract phenolic compounds and flavonoids from citrus peels with reduced solvent use and improved efficiency [24]. Ethanol-water mixtures are commonly employed as eco-friendly solvents under pressure, yielding clean and potent extracts. PLE offers automation potential and reproducibility; however, the thermal degradation of heat-sensitive phytochemicals and the complexity of equipment handling may limit its use in specific settings.

### *4.5. Natural deep eutectic solvents (NADES)*

Natural deep eutectic solvents (NADES) are emerging green solvents formed by mixing two or more natural components — such as sugars, amino acids, or organic acids — to create a low-melting, highly soluble liquid. Their tunable polarity and biocompatibility make them suitable alternatives to conventional organic solvents for extracting a wide range of phytochemicals. In citrus waste applications, Plaza et al. [25] successfully used NADES in combination with UAE to extract polyphenols from citrus peels, achieving high recovery and antioxidant activity with minimal environmental impact. NADES offers distinct advantages, including low toxicity, reusability, and potential food-grade applications. However, challenges such as high viscosity, which can reduce mass transfer rates, and the need for regulatory clarity regarding their use in consumable products remain areas of ongoing research.

### *4.6. Enzyme-assisted extraction (EAE)*

Enzyme-assisted extraction (EAE) utilizes specific enzymes such as cellulases and pectinases to degrade the structural polysaccharides in plant cell walls, thereby facilitating the release of bound bioactives. This method operates under mild conditions, preserving the integrity of heat-sensitive compounds while enhancing extraction yields. Citrus peel matrix applications of EAE have yielded soluble dietary fibers, phenolics, and flavonoids [26], with some research combining it with UAE or MAE to increase effectiveness even more [27,28]. The method is especially appealing for creating less processed, clean-label extracts. EAE is limited by enzyme cost, specificity, and sensitivity to environmental factors, including pH and temperature, which demand exact adjustment even with its advantages. Table 2 compares green extraction techniques applied to citrus fruit wastes.

Table 2. **Comparative overview of green extraction techniques applied to citrus fruit wastes**

Таблица 2. **Сравнительный обзор методов «зелёной» экстракции, применяемых для отходов переработки плодов цитрусовых**

| Technique | Solvents used | Target compounds | Advantages | Limitations | References |
|---|---|---|---|---|---|
| **Ultrasound-Assisted Extraction (UAE)** | Water, ethanol, and NADES | Flavonoids, phenolics, essential oils | Short extraction time, low solvent use, improved yield | Localized heat may degrade compounds; scale-up challenges | [29] |
| **Microwave-Assisted Extraction (MAE)** | Water, ethanol | Pectin, polyphenols, flavonoids | Fast and energy-efficient, high yield | Risk of compound degradation, uneven heating | [30] |
| **Supercritical Fluid Extraction (SFE)** | $CO_2$ (± ethanol co-solvent) | Essential oils, limonene, limonoids | Solvent-free extracts, selective for non-polar compounds | High setup cost, limited polar compound solubility | [31] |
| **Pressurized Liquid Extraction (PLE)** | Ethanol-water mixtures | Phenolic acids, flavonoids | Efficient, automatable, green solvents | Thermal degradation risks, equipment cost | [32] |
| **Natural Deep Eutectic Solvent Extraction (NADES)** | Choline chloride + sugars/acids | Polyphenols, flavonoids, carotenoids | Non-toxic, customizable, biodegradable | High viscosity affects mass transfer | [33] |
| **Enzyme-Assisted Extraction (EAE)** | Water (with added enzymes) | Flavonoids, soluble fibers, pectin | Mild conditions, clean-label extracts | Costly enzymes, sensitive to pH/temperature | [34] |

## 5. Factors influencing green extraction yields

A complex interaction of technological, chemical, and biological aspects controls the efficacy of green extraction methods in extracting bioactive chemicals from citrus wastes. Maximizing yield is simply one benefit of optimizing these factors; another is guaranteeing the obtained molecules' integrity, functionality, and scalability. The most important determinants are solvent choice, extraction time, temperature, solid-to-solvent ratio, particle size, plant matrix composition, and pretreatment techniques [35].

Extraction efficiency is highly influenced by solvent polarity and composition since the type of solvent determines the solubility of bioactive molecules such as phenolics, flavonoids, and limonoids [36]. Ethanol-water combinations are popular for citrus extractions because of their food-grade safety, adjustable polarity, and environmental compatibility [37]. Natural deep eutectic solvents (NADES) can likewise be tailored to target particular molecules. Temperature has two effects: while moderate heating might improve solubility and diffusion, too high temperatures may destroy heat-sensitive molecules, including certain essential oils and ascorbic acid. Balancing efficiency with thermal stability becomes crucial in methods such as MAE or PLE, where higher temperatures are applied.

Furthermore, the extraction time is strictly under control. While extended periods may not significantly boost yield and potentially risk oxidative degradation, short timeframes may result in inadequate cell wall breakdown and poor chemical release [38]. Additionally, the solid-to-solvent ratio influences concentration gradients and solvent saturation levels that determine the driving force for mass transfer [39]. A higher ratio generally promotes better extraction, but excessive solvent volumes can be economically and environmentally unfavorable [40].

Other influential factors (Table 3) include the particle size of citrus waste, which affects the surface area available for solvent interaction, and pretreatments such as drying, grinding, or enzymatic hydrolysis that can enhance matrix accessibility [41]. Notably, citrus species and cultivars also contribute to variability, as differences in peel thickness, wax content, and flavonoid profiles influence extractability. Hence, developing efficient and reproducible green extraction processes requires systematic optimization through experimental design tools (e. g., response surface methodology) tailored to the specific citrus matrix and target bioactive.

## 6. Comparison with conventional methods

Traditional extraction techniques (maceration, Soxhlet extraction, hydrodistillation, and refluxing) have long been used to isolate bioactive compounds from plant matrices, including citrus fruit wastes. While these methods are well-established and relatively simple to implement, they are increasingly considered inefficient, environmentally unsustainable, and unsuitable for industrial-scale production of clean-label products [48]. The main drawbacks of conventional methods include long extraction times, high solvent and energy consumption, and limited selectivity toward target compounds. In addition, many organic solvents (e. g., methanol, chloroform, hexane) pose significant toxicity and flammability risks, which conflict with current safety and regulatory standards, especially in the food and nutraceutical sectors.

In contrast, green extraction methods (such as UAE, MAE, SFE, PLE, NADES, and EAE) offer substantial improvements (Table 5) in terms of extraction efficiency, sustainability, and product quality [49]. For instance, UAE and MAE reduce extraction time from hours to minutes using significantly less solvent [50]. SFE with $CO_2$ enables the production of solvent-free essential oils with high aroma and antioxidant retention [51]. NADES and enzyme-assisted techniques allow for selective, mild, and biodegradable extractions that maintain the bioactivity and safety of compounds like hesperidin and limonene [52]. Additionally, green methods offer better process scalability, automation potential, and integration with downstream processes (e. g., encapsulation, formulation), making them more aligned with circular economy models.

Nonetheless, the green extraction paradigm is increasingly favored, particularly in the citrus industry, which generates massive quantities of bioactive-rich waste annually [53]. As global markets shift toward eco-certified, residue-free, and functionally enhanced ingredients, the demand for green extraction technologies in citrus waste valorization is expected to grow exponentially. Comparative assessments support a gradual transition from solvent-intensive, batch-based systems to sustainable, high-throughput green extraction platforms. Table 4 compares conventional and green extraction methods for citrus waste valorization.

## 7. Applications of extracted bioactive compounds

Bioactive compounds recovered from citrus fruit wastes through green extraction technologies possess broad-spectrum functionality and significant commercial value. Their potent antioxidant, antimicrobial, anti-inflammatory, and metabolic regulatory properties make them highly desirable for formulation into various food, health, and industrial products (Table 6). By transforming citrus by-products into value-added ingredients, industries can simultaneously meet consumer demand for natural alternatives and support sustainable processing models [58].

In the food sector, citrus-derived compounds are extensively used as natural preservatives, fortifying agents, and functional ingredients [59]. Flavonoids such as hesperidin and naringin, along with phenolic acids and limonoids, have been incorporated into beverages, dairy products, and bakery items to enhance shelf life, nutritional value, and health benefits [60]. Pectin, abundantly present in citrus peels, is a gelling, thickening, and stabilizing agent in low-sugar jams, yogurts, and fruit-based products [61]. Citrus essential oils (especially limonene-rich fractions) exhibit potent antimicrobial activity and are used in edible coatings and active packaging films to inhibit microbial spoilage and oxidation [62]. Moreover, encapsulated citrus extracts are increasingly added to nutraceutical powders, gummies, and functional snacks, offering bioactive delivery with improved stability and controlled release.

Importantly, citrus-derived compounds also play a pivotal role in sustainable material development [63]. Biodegradable films and bioplastics based on citrus pectin or fiber residues are emerging as eco-friendly packaging alternatives. Combined with bioactive essential oils, these materials offer dual benefits of environmental safety and food preservation [64]. Integrating citrus waste-derived ingredients into such applications exemplifies a circular economy approach, where waste is not merely discarded but repurposed as a valuable resource across multiple industries.

## 8. Challenges and future perspectives

While green extraction technologies offer a sustainable and efficient pathway for valorizing citrus fruit wastes, several technical, economic, and regulatory challenges continue to limit their widespread adoption, especially in large-scale food and pharmaceutical applications [73]. One major hurdle is the high capital investment required for advanced equipment such as supercritical fluid systems or industrial-scale microwave reactors, which may not be feasible for small or mid-sized enterprises [74]. Additionally, although promising in lab-scale trials, methods such as enzyme-assisted extraction and NADES-based processes often face scalability issues due to factors like enzyme instability or high solvent viscosity [75]. These technical constraints must be addressed through

Table 3. **Optimization parameters influencing the yield and quality of bioactive compounds from citrus wastes**

Таблица 3. **Параметры оптимизации, влияющие на выход и качество биоактивных соединений из отходов переработки цитрусовых**

| Parameter | Typical Range | Effect on Extraction | Best Practices in Citrus Waste Applications | References |
|---|---|---|---|---|
| **Solvent type and polarity** | Ethanol-water (20–80 %), NADES | Determines solubility and selectivity for target compounds | Ethanol-water (50–70 %) optimal for flavonoids and phenolics; NADES for thermolabile compounds | [42] |
| **Temperature** | 25–80 °C (UAE/MAE); up to 120 °C (PLE) | Increases diffusion and solubility but may degrade sensitive bioactives | Moderate temperatures (40–60 °C) balance efficiency and stability | [43] |
| **Extraction Time** | 5–60 min | Affects mass transfer and compound recovery | 15–30 minutes is sufficient for UAE/MAE with minimal degradation | [44] |
| **Solid-to-Solvent Ratio** | 1:10 to 1:40 (w/v) | Impacts solvent saturation and extraction capacity | 1:20–1:30 are widely reported for citrus peels | [45] |
| **Particle Size** | < 0.5 mm to > 2 mm | Influences surface area and solvent penetration | Fine powders (<1 mm) enhance yield but increase filtration difficulty | [7] |
| **pH (if applicable)** | 3–7 | It affects enzyme activity and compound stability | Neutral pH is preferred in enzyme-assisted extractions | [46] |
| **Pretreatment Methods** | Drying, grinding, and enzymatic hydrolysis | Improves matrix accessibility and release of bound compounds | Oven drying and enzymatic pretreatment increase polyphenol yield | [47] |

Table 4. **Comparison between conventional and green extraction methods for citrus waste valorization [54–57]**

Таблица 4. **Сравнение между традиционными методами и методами «зелёной» экстракции для валоризации отходов переработки цитрусовых [54–57]**

| Aspect | Conventional methods | Green extraction methods |
|---|---|---|
| **Common techniques** | Maceration, Soxhlet, Hydrodistillation | UAE, MAE, SFE, PLE, NADES, EAE |
| **Solvent type** | Organic solvents (methanol, hexane, chloroform) | Water, ethanol, NADES, $CO_2$ (SFE) |
| **Extraction time** | Long (1–24 hours) | Short (5–30 minutes for UAE/MAE) |
| **Temperature requirement** | High (reflux temperatures) | Moderate to controlled, energy-efficient |
| **Selectivity for bioactives** | Low (co-extraction of impurities) | High (targeted extraction possible with tuning parameters) |
| **Environmental impact** | High (toxic solvents, energy-intensive) | Low (eco-friendly, minimal waste) |
| **Product purity** | Often requires post-purification | High purity, fewer contaminants |
| **Scalability** | Limited for industrial use | Better scalability and process automation |
| **Cost** | Lower initial cost but higher operating expense | Higher initial investment but lower long-term cost |
| **Regulatory safety** | Risk of solvent residues | Safer for food and pharma applications |

Table 5. **Green extraction versus conventional methods [58–62]**

Таблица 5. **Зеленая экстракция по сравнению с обычными методами [58-62]**

| Technique | Solvent usage | Temperature | Extraction time | Yield Efficiency | Scalability | Eco-friendliness |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Conventional solvent extraction** | High (organic solvents) | High | Long (hours) | Moderate | High (but low safety) | Low |
| **UAE (Ultrasound-assisted)** | Moderate | Low; Medium | Short (minutes) | High | Medium; High | High |
| **MAE (Microwave-assisted)** | Low | Medium; High | Very short (minutes) | High | Medium (limited by scale) | Medium; High |
| **SFE (Supercritical $CO_2$)** | No organic solvent | Medium | Short | High | Medium (costly setup) | Very high |
| **PLE (Pressurized liquid)** | Low | Medium; High | Moderate | High | Medium; High | High |
| **NADES-based extraction** | Very low (green solvents) | Low; Medium | Moderate | High (selective) | Still emerging | Very high |
| **EAE (Enzyme-assisted)** | Water-based | Low | Moderate | High (selective) | Medium | High |

Table 6. **Applications of citrus waste-derived bioactive compounds in various industries**

Таблица 6. **Применение биоактивных соединений, полученных из отходов переработки цитрусовых, в различных промышленностях**

| Bioactive compound | Product example | Function/Benefit | Target industry | References |
|---|---|---|---|---|
| **Hesperidin, Naringin** | Functional beverages, nutraceutical tablets | Antioxidant, anti-inflammatory, and cardiovascular support | Food, Nutraceutical | [65] |
| **Phenolic Acids** | Fortified yogurts, antioxidant powders | Oxidative stress reduction, antimicrobial | Food, Pharmaceutical | [66] |
| **Limonoids** | Herbal capsules, liver health supplements | Anti-cancer, detoxification enzyme modulation | Nutraceutical, Pharma | [67] |
| **Pectin** | Low-sugar jam, edible films, bioplastics | Gelling, thickening, and the prebiotic effect | Food, Packaging | [68] |
| **Essential oils (Limonene)** | Antimicrobial food wraps, eco-cleaners | Natural preservative, fragrance, and antifungal | Food Packaging, Cosmetics | [69] |
| **Citrus flavonoids** | Skincare serums, anti-aging creams | Skin protection, UV scavenging | Cosmetics, Personal care | [70] |
| **Citrus fiber residues** | Biodegradable films, prebiotic snacks | Gut microbiota modulation, material structuring | Functional oods, Packaging | [71] |
| **Citrus seed extracts** | Oil-based supplements, dermatological oils | Vitamin E source, cholesterol-lowering, hepatoprotective | Nutraceutical, Cosmeceutical | [72] |

engineering innovation, solvent standardization, and modular system designs to make green extractions more accessible and cost-effective.

From a regulatory perspective, using novel green solvents (especially NADES) and enzyme-based systems in food and nutraceuticals still require extensive toxicological evaluation and regulatory harmonization, particularly when intended for direct human consumption. Moreover, despite the growing demand for natural bioactive ingredients, the market competitiveness of synthetic additives (often cheaper and more consistent) poses a challenge to the economic viability of citrus-derived products. On the research front, the lack of standardized protocols for optimizing extraction parameters across different citrus species and plant matrices hampers reproducibility and industrial translation.

Looking ahead, integrating innovative technologies, such as artificial intelligence (AI), process modeling, and real-time sensor analytics, may enable more precise control and optimization of green extraction processes. Additionally, hybrid techniques such as UAE-NADES, MAE-Enzyme, or SFE integrated with encapsulation units could enhance extracts' yield and functional performance. On a broader scale, developing biorefinery models that simultaneously produce multiple products (e. g., pectin, antioxidants, essential oils, and dietary fibers) from the same citrus waste stream will be critical for enhancing resource efficiency and profitability. Collaborations between academia, industry, and policy-makers are essential to overcome existing barriers and promote a transition toward a circular citrus economy that transforms waste into wellness.

## 9. Conclusion

Citrus fruits generate vast quantities of by-products — primarily peels, pulp, and seeds — which, though often discarded as waste, are rich reservoirs of high-value bioactive compounds such as flavonoids, phenolic acids, pectin, limonoids, essential oils, and dietary fibers. The transition from conventional solvent-based extraction to green extraction technologies has opened new avenues for the sustainable recovery and application of these compounds in food, pharmaceutical, nutraceutical, cosmetic, and packaging industries. Techniques such as ultrasound-assisted extraction, microwave-assisted extraction, supercritical fluid extraction, natural deep eutectic solvents, and enzyme-assisted extraction improve extraction efficiency and selectivity and reduce environmental impact, aligning well with modern circular economy goals.

Despite current limitations (including scalability challenges, high equipment costs, and regulatory gaps), ongoing technological innovation and growing market demand for clean-label, natural ingredients are rapidly driving the adoption of green extractions. Integrating innovative optimization tools, hybrid methods, and biorefinery models will further enable the valorization of citrus fruit wastes on an industrial scale. This review highlights the substantial potential of citrus waste as a valuable resource, emphasizing the need for interdisciplinary collaboration to realize its benefits fully. In doing so, citrus waste can be transformed from an environmental burden into a renewable bioresource, contributing to a more sustainable and health-oriented future.

## REFERENCES


1. Kato-Noguchi, H., Kato, M. (2025). Pesticidal activity of citrus fruits for the development of sustainable fruit-processing waste management and agricultural production. *Plants*, 14(5), Article 754. https://doi.org/10.3390/plants14050754
2. FAOSTAT. (2025). Commodities by country. Retrieved from https://www.fao.org/faostat/en/#rankings/commodities_by_country Accessed March 25, 2025.
3. Andrade, M. A., Barbosa, C. H., Shah, M. A., Ahmad, N., Vilarinho, F., Khwaldia, K. et al. (2023). Citrus by-products: Valuable source of bioactive compounds for food applications. *Antioxidants*, 12(1), Article 38. https://doi.org/10.3390/antiox12010038
4. Russo, C., Maugeri, A., Lombardo, G.E., Musumeci, L., Barreca, D., Rapisarda, A. et al. (2021). The second life of citrus fruit waste: A valuable source of bioactive compounds. *Molecules*, 26(19), Article 5991. https://doi.org/10.3390/molecules26195991
5. Anticona, M., Blesa, J., Frigola, A., Esteve, M. J. (2020). High biological value compounds extraction from citrus waste with non-conventional methods. *Foods*, 9(6), Article 811. https://doi.org/10.3390/foods9060811
6. Grover, S., Aggarwal, P., Kumar, A., Kaur, S., Yadav, R., Babbar, N. (2025). Utilizing citrus peel waste: A review of essential oil extraction, characterization, and food-industry potential. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 15(4), 5043–5064. https://doi.org/10.1007/s13399-024-05382-y
7. Maqbool, Z., Khalid, W., Atiq, H.T., Koraqi, H., Javaid, Z., Alhag, S.K. (2023). Citrus waste as source of bioactive compounds: Extraction and utilization in health and food industry. *Molecules*, 28(4), Article 1636. https://doi.org/10.3390/molecules28041636
8. Fernández-Cabal, J., Avilés-Betanzos, K. A., Cauich-Rodríguez, J. V., Ramírez-Sucre, M. O., Rodríguez-Buenfil, I. M. (2025). Recent developments in Citrus aurantium L.: An overview of bioactive compounds, extraction techniques, and technological applications. *Processes*, 13(1), Article 120. https://doi.org/10.3390/pr13010120
9. Acosta-vega, L., Cifuentes, A., Ibáñez, E. (2025). Exploring natural deep eutectic solvents (NADES) for enhanced essential oil extraction: Current insights and applications. *Molecules*, 30(2), Article 284. https://doi.org/10.3390/molecules30020284
10. Talhami, M., Kashem, A. H. M., Alkhamri, K. A., Albatarni, O., Thaher, M. I., Das, P. et al. (2025). Sustainable and low-cost protic ionic liquid-based recovery of oil from agricultural wastes "date pits" for biofuel production. *Resources, Conservation and Recycling Advances*, 25, Article 200246. https://doi.org/10.1016/j.rcradv.2025.200246
11. Cannavacciuolo, C., Pagliari, S., Celano, R., Campone, L., Rastrelli, L. (2024). Critical analysis of green extraction techniques used for botanicals: Trends, priorities, and optimization strategies-A review. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 173, Article 117627. https://doi.org/10.1016/j.trac.2024.117627
12. Bastos, K. V. L. da S., de Souza, A. B., Tomé, A. C., Souza, F. de M. (2025). New strategies for the extraction of antioxidants from fruits and their by-products: A systematic review. *Plants*, 14(5), Article 755. https://doi.org/10.3390/plants14050755
13. Samanta, S., Banerjee, J., Ahmed, R., Dash, S. K. (2023). Potential benefits of bioactive functional components of citrus fruits for health promotion and disease prevention. Chapter in a book: Recent Advances in Citrus Fruits. Springer, Cham, 2023. https://doi.org/10.1007/978-3-031-37534-7_15
14. Barreca, D., Gattuso, G., Bellocco, E., Calderaro, A., Trombetta, D., Smeriglio, A. et al. (2017). Flavanones: Citrus phytochemical with health-promoting properties. *BioFactors*, 43(4), 495–506. https://doi.org/10.1002/biof.1363
15. Naseer, B., Srivastava, G., Qadri, O. S., Faridi, S. A., Islam, R. U., Younis, K. (2018). Importance and health hazards of nanoparticles used in the food industry. *Nanotechnology Reviews*, 7(6), 623–641. https://doi.org/10.1515/ntrev-2018-0076
16. Sharma, P., Vishvakarma, R., Gautam, K., Vimal, A., Kumar Gaur, V., Farooqui, A. et al. (2022). Valorization of citrus peel waste for the sustainable production of value-added products. *Bioresource Technology*, 351, Article 127064. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127064
17. Kanaze, F. I., Termentzi, A., Gabrieli, C., Niopas, I., Georgarakis, M., Kokkalou, E. (2008). The phytochemical analysis and antioxidant activity assessment of orange peel (*Citrus sinensis*) cultivated in Greece — Crete indicates a new commercial source of hesperidin. *Biomedical Chromatography*, 23(3), 239–249. https://doi.org/10.1002/bmc.1090
18. Ellouze, I. (2022). Citrus bio-wastes: A source of bioactive, functional products and non-food uses. Chapter in a book: Mediterranean Fruits Bio-wastes. Springer, Cham, 2022. https://doi.org/10.1007/978-3-030-84436-3_9
19. Pop, C., Suharoschi, R., Pop, O. L. (2021). Dietary fiber and prebiotic compounds in fruits and vegetables food waste. *Sustainability*, 13(13), Article 7219. https://doi.org/10.3390/su13137219
20. Silva, T. R. D., Silva, A. J. R. D. (2023). Chemical profile of persian lime seeds (*Citrus Limettioides* T.): Focus on limonoids and polyphenols. *Anais Da Academia Brasileira de Ciências,* 95(suppl 2), Article e20230322. https://doi.org/10.1590/0001-3765202320230322
21. Manzur, M., Luciardi, M. C., Blázquez, M. A., Alberto, M. R., Cartagena, E., Arena, M. E. (2023). Citrus sinensis essential oils an innovative antioxidant and antipathogenic dual strategy in food preservation against spoliage bacteria. *Antioxidants*, 12(2), Article 246. https://doi.org/10.3390/antiox12020246
22. Kumar, S., Konwar, J., Purkayastha, M. D., Kalita, S., Mukherjee, A., Dutta, J. (2023). Current progress in valorization of food processing waste and by-products for pectin extraction. *International Journal of Biological Macromolecules*, 239, Article 124332. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.124332
23. Granone, L. I., Hegel, P. E., Pereda, S. (2022). Citrus fruit processing by pressure intensified technologies: A review. *The Journal of Supercritical Fluids*, 188, Article 105646. https://doi.org/10.1016/j.supflu.2022.105646
24. Chaves, J. O., Sanches, V. L., Viganó, J., de Souza Mesquita, L. M., de Souza, M. C., da Silva, L. C. et al. (2022). Integration of pressurized liquid extraction and in-line solid-phase extraction to simultaneously extract and concentrate phenolic compounds from lemon peel (Citrus limon L.). *Food Research International*, 157, Article 111252. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.111252
25. Plaza, M., Marina, M. L. (2025). Natural deep eutectic solvents and ultrasound-assisted extraction for the recovery of antioxidant phenolic compounds from orange pomace. *Microchemical Journal*, 212, Article 113366. https://doi.org/10.1016/j.microc.2025.113366
26. 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
27. Saeed, R., Ahmed, D., Mushtaq, M. (2022). Ultrasound-aided enzyme-assisted efficient extraction of bioactive compounds from Gymnema sylvestre and optimization as per response surface methodology. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 29, Article 100818. https://doi.org/10.1016/j.scp.2022.100818
28. Tizón Alba, A., Aliaño-González, M. J., Palma, M., Fernández Barbero, G., Carrera, C. (2023). Enhancing efficiency of enzymatic-assisted extraction method for evaluating bioactive compound analysis in mulberry: An optimization approach. *Agronomy*, 13(10), Article 2548. https://doi.org/10.3390/agronomy13102548
29. Thiruvalluvan, M., Gupta, R., Kaur, B. P. (2025). Optimization of ultrasound — assisted extraction conditions for the recovery of phenolic compounds from sweet lime peel waste. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 15(5), 6781–6803. https://doi.org/10.1007/s13399-024-05752-6
30. García-Martín, J. F., Feng, C.-H., Domínguez-Fernández, N.-M., Álvarez-Mateos, P. (2023). Microwave-assisted extraction of polyphenols from bitter orange industrial waste and identification of the main compounds. *Life*, 13(9), Article 1864. https://doi.org/10.3390/life13091864
31. Romano, R., De Luca, L., Aiello, A., Rossi, D., Pizzolongo, F., Masi, P. (2022). Bioactive compounds extracted by liquid and supercritical carbon dioxide from citrus peels. *International Journal of Food Science and Technology*, 57(6), 3826–3837. https://doi.org/10.1111/ijfs.15712
32. Sanches, V. L., Strieder, M. M., Breitkreitz, M. C., Bezerra, R. M. N., O. Chaves, J., Lopes de Oliveira, I. et al. (2024). Pressurized liquid extraction assisted by high-intensity ultrasound to obtain hesperidin from lime waste: Integration of in-line purification and on-line chromatographic analysis. *Food Research International,* 182, Article 114134. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2024.114134
33. Panić, M., Andlar, M., Tišma, M., Rezić, T., Šibalić, D., Cvjetko Bubalo, M. et al. (2021). Natural deep eutectic solvent as a unique solvent for valorisation of orange peel waste by the integrated biorefinery approach. *Waste Management*, 120, 340–350. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.11.052
34. Multari, S., Licciardello, C., Caruso, M., Anesi, A., Martens, S. (2021). Flavedo and albedo of five citrus fruits from Southern Italy: Physicochemical characteristics and enzyme — assisted extraction of phenolic compounds. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 15(2), 1754–1762. https://doi.org/10.1007/s11694-020-00787-5
35. Ramesh, M. M., Shankar, N. S., Venkatappa, A. H. (2024). Driving/critical factors considered during extraction to obtain bioactive enriched extracts. *Pharmacognosy Reviews*, 18(35), 68–81. https://doi.org/10.5530/phrev.2024.18.7
36. Alshammari, O. A. O., Almulgabsagher, G. A. A., Ryder, K. S., Abbott, A. P. (2021). Effect of solute polarity on extraction efficiency using deep eutectic solvents. *Green Chemistry*, 23(14), 5097–5105. https://doi.org/10.1039/d1gc01747k
37. da Silva, R. F., Carneiro, C. N., do C. de Sousa, C. B., J. V. Gomez, F., Espino, M., Boiteux, J. et al. (2022). Sustainable extraction bioactive compounds procedures in medicinal plants based on the principles of green analytical chemistry: A review. *Microchemical Journal*, 175, Article 107184. https://doi.org/10.1016/j.microc.2022.107184
38. Li, H., Li, Z., Wang, P., Liu, Z., An, L., Zhang, X. et al. (2024). Evaluation of citrus pectin extraction methods: Synergistic enhancement of pectin' s antioxidant capacity and gel properties through combined use of organic acids, ultrasonication, and microwaves. *International Journal of Biological Macromolecules*, 266, Article 131164. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.131164
39. Hobbi, P., Okoro, O. V., Delporte, C., Alimoradi, H., Podstawczyk, D. et al. (2021). Kinetic modelling of the solid — liquid extraction process of polyphenolic compounds from apple pomace: Influence of solvent composition and temperature. *Bioresources and Bioprocessing*, 8(1), Article 114. https://doi.org/10.1186/s40643-021-00465-4
40. More, P. R., Jambrak, A. R., Arya, S. S. (2022). Green, environment-friendly and sustainable techniques for extraction of food bioactive compounds and waste valorization. *Trends in Food Science and Technology,* 128, 296–315. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2022.08.016
41. Sandhu, H. K., Sinha, P., Emanuel, N., Kumar, N., Sami, R., Khojah, E. et al. (2021). Effect of ultrasound-assisted pretreatment on extraction efficiency of essential oil and bioactive compounds from citrus waste by-products. *Separations*, 8(12), Article 244. https://doi.org/10.3390/separations8120244
42. Ramírez-Sucre, M. O., Avilés-Betanzos, K. A., López-Martínez, A., Rodríguez-Buenfil, I. M. (2024). Evaluation of polyphenol profile from citrus peel obtained by natural deep eutectic solvent/ultrasound extraction. *Processes*, 12(10), Article 2072. https://doi.org/10.3390/pr12102072
43. Sharma, P., Osama, K., Varjani, S. (2023). Microwave — assisted valorization and characterization of Citrus limetta peel waste into pectin as a perspective food additive. *Journal of Food Science and Technology*, 60(4), 1284–1293. https://doi.org/10.1007/s13197-023-05672-9
44. Medina-Torres, N., Espinosa-Andrews, H., Trombotto, S., Ayora-Talavera, T., Patrón-Vázquez, J., González-Flores, T. et al. (2019). Ultrasound-assisted extraction optimization of phenolic compounds from citrus latifolia waste for chitosan bioactive nanoparticles development. *Molecules,* 24(19), Article 3541. https://doi.org/10.3390/molecules24193541
45. Anastasopoulou, E., Graikou, K., Ziogas, V., Ganos, C., Calapai, F., Chinou, I. (2024). Chemical profiles and antimicrobial properties of essential oils from orange, pummelo, and tangelo cultivated in greece. *Horticulturae*, 10(8), Article 792. https://doi.org/10.3390/horticulturae10080792
46. Zhou, L., Luo, J., Xie, Q., Huang, L., Shen, D., Li, G. (2023). Dietary fiber from navel orange peel prepared by enzymatic and ultrasound-assisted deep eutectic solvents: Physicochemical and prebiotic properties. *Foods*, 12(10), Article 2007. https://doi.org/10.3390/foods12102007
47. Qin, S., Lv, C., Wang, Q., Zheng, Z., Sun, X., Tang, M. et al. (2018). Extraction, identification, and antioxidant property evaluation of limonin from pummelo seeds. *Animal Nutrition*, 4(3), 281–287. https://doi.org/10.1016/j.aninu.2018.05.005

48. Alexandri, M., Kachrimanidou, V., Papapostolou, H., Papadaki, A., Kopsahelis, N. (2022). Sustainable food systems: The case of functional compounds towards the development of clean label food products. *Foods*, 11(18), Article 2796. https://doi.org/10.3390/foods11182796
49. Picot-Allain, C., Mahomoodally, M. F., Ak, G., Zengin, G. (2021). Conventional versus green extraction techniques — a comparative perspective. *Current Opinion in Food Science*, 40, 144–156. https://doi.org/10.1016/j.cofs.2021.02.009
50. Pereira, A. G., Cruz, L., Cassani, L., Chamorro, F., Lourenço-lopes, C., Freitas, V. et al. (May 17–31, 2023). *Comparative study of microwave-assisted extraction and ultrasound-assisted extraction techniques (MAE vs. UAE) for the optimized production of enriched extracts in phenolic compounds of Camellia japonica var Eugenia de Montijo'.* The 2nd International Electronic Conference on Processes: Process Engineering — Current State and Future Trends. MDPI, 2023. https://doi.org/10.3390/ecp2023-14615
51. Dashtian, K., Kamalabadi, M., Ghoorchian, A., Ganjali, M. R., Rahimi-Nasrabadi, M. (2024). Integrated supercritical fluid extraction of essential oils. *Journal of Chromatography A*, 1733, Article 465240. https://doi.org/10.1016/j.chroma.2024.465240
52. Aduloju, E. I., Yahaya, N., Zain, N. M., Kamaruddin, M. A., Abd Hamid, M. A. (2023). An overview on the use of DEEP eutectic solvents for green extraction of some selected bioactive compounds from natural matrices. *Advanced Journal of Chemistry-Section A,* 6(3), 253–300.
53. Madhumita, M., Deol, P., Singh, T., K. Prabhakar, P. (2024). Emerging technologies for extraction of functional components. Chapter in a book: Adding Value to Fruit Wastes, Academic Press, 2024. https://doi.org/10.1016/B978-0-443-13842-3.00002-2
54. Dean, J. R. (2009). Extraction Techniques in Analytical Sciences. Blackwell Publishing, 2009.
55. Lebovka, N., Vorobiev, E., Chemat, F. (2016). Enhancing Extraction Processes in the Food Industry. CRC Press, 2016. https://doi.org/10.1201/b1124
56. Jibhkate, Y. J., Awachat, A. P., Lohiya, R. T., Umekar, M. J., Hemke, A. T., Gupta, K. R. (2023). Extraction: An important tool in the pharmaceutical field. *International Journal of Science and Research Archive*, 10(1), 555–568. https://doi.org/10.30574/ijsra.2023.10.1.0768
57. Kislik, V. S. (2011). Solvent Extraction: Classical and Novel Approaches. Elsevier, 2011.
58. Venkataraman, S., Rajendran, D. S., Kumar, P. S., Rangasamy, G., Vaidyanathan, V. K. (2024). A comprehensive review on the refinery of citrus peel towards the production of bioenergy, biochemical and biobased value-added products: Present insights and futuristic challenges. *Waste and Biomass Valorization*, 15(11), 6491–6512. https://doi.org/10.1007/s12649-024-02557-6
59. Wedamulla, N. E., Fan, M., Choi, Y.-J., Kim, E.-K. (2022). Citrus peel as a renewable bioresource: Transforming waste to food additives. *Journal of Functional Foods*, 95, Article 105163. https://doi.org/10.1016/j.jff.2022.105163
60. Petcu, C. D., Tăpăloagă, D., Mihai, O. D., Gheorghe-Irimia, R.-A., Negoiță, C., Georgescu, I. M. et al. (2023). Harnessing natural antioxidants for enhancing food shelf life: Exploring sources and applications in the food industry. *Foods*, 12(17), Article 3176. https://doi.org/10.3390/foods12173176
61. Roy, T. (2022). Characterization of pectin extracted from pomegranate peel (Punica granatum L.) and its application in jelly preparation. Doctoral dissertation. Chattogram Veterinary and Animal Sciences University. Chittagong, Bangladesh, 2022.
62. Kačániová, M., Čmiková, N., Vukovic, N. L., Verešová, A., Bianchi, A., Garzoli, S.et al. (2024). Citrus limon essential oil: Chemical composition and selected biological properties focusing on the antimicrobial (in vitro, in situ), antibiofilm, insecticidal activity and preservative effect against salmonella enterica inoculated in carrot. *Plants*, 13(4), Article 524. https://doi.org/10.3390/plants13040524
63. 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
64. Basavegowda, N., Baek, K.-H. (2021). Synergistic antioxidant and antibacterial advantages of essential oils for food packaging applications. *Biomolecules*, 11(9), Article 1267. https://doi.org/10.3390/biom11091267
65. Chandimala, U., Ajtony, Z., Sik, B. (July 29 — August 1, 2024). *Citrus flavonoids (naringin and hesperidin) as functional ingredients in dairy products*. The 10th International Conference on Agricultural and Biological Sciences (ABS2024). Gyor, Hungary, 2024. https://doi.org/10.1051/bioconf/202412502004
66. Liu, S., Lou, Y., Li, Y., Zhang, J., Li, P., Yang, B. et al. (2022). Review of phytochemical and nutritional characteristics and food applications of Citrus L. fruits. *Frontiers in Nutrition,* 9, Article 968604. https://doi.org/10.3389/fnut.2022.968604
67. Saber, F. R., Salehi, H., Khallaf, M. A., Rizwan, K., Gouda, M., Ahmed, S., Zengin, G. et al. (2025). Limonoids: Advances in extraction, characterization, and applications. *Food Reviews International*, 41(6), 1871–1932. https://doi.org/10.1080/87559129.2025.2456494
68. Roy, S., Priyadarshi, R., Łopusiewicz, Ł., Biswas, D., Chandel, V., Rhim, J.-W. (2023). Recent progress in pectin extraction, characterization, and pectin-based films for active food packaging applications: A review. *International Journal of Biological Macromolecules* 239, Article 124248. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.124248
69. Andriotis, E. G., Papi, R. M., Paraskevopoulou, A., Achilias, D. S. (2021). Synthesis of D-limonene loaded polymeric nanoparticles with enhanced antimicrobial properties for potential application in food packaging. *Nanomaterials*, 11(1), Article 191. https://doi.org/10.3390/nano11010191
70. Sebghatollahi, Z., Ghanadian, M., Agarwal, P., Ghaheh, H. S., Mahato, N., Yogesh, R. et al. (2022). Citrus flavonoids: Biological activities, implementation in skin health, and topical applications: A review. *ACS Food Science and Technology*, 2(9), 1417–1432. https://doi.org/10.1021/acsfoodscitech.2c00165
71. Liu, X., Wang, B., Tang, S., Yue, Y., Xi, W., Tan, X. et al. (2024). Modification, biological activity, applications, and future trends of citrus fiber as a functional component: A comprehensive review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 269(Pt 1), Article 131798. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.131798
72. 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
73. Yadav, V., Sarker, A., Yadav, A., Miftah, A. O., Bilal, M., Iqbal, H. M. N. (2022). Integrated biorefinery approach to valorize citrus waste: A sustainable solution for resource recovery and environmental management. *Chemosphere*, 293, Article 133459. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.133459
74. Radoiu, M., Mello, A. (2022). Technical advances, barriers, and solutions in microwave-assisted technology for industrial processing. *Chemical Engineering Research and Design*, 181, 331–342. https://doi.org/10.1016/j.cherd.2022.03.029
75. Fu, M., Zhang, H., Bai, J., Cui, M., Liu, Z., Kong, X. et al. (2025). Application of deep eutectic solvents with modern extraction techniques for the recovery of natural products: A review. *ACS Food Science and Technology*, 5(2), 444–461. https://doi.org/10.1021/acsfoodscitech.4c00973



| AUTHOR INFORMATION | СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ |
|---|---|
| **Affiliation** | **Принадлежность к организации** |
| **Abdalla S. M. Ammar**, Professor, Food Science Department, Faculty of Agriculture, Cairo University<br>Gamaa Street, Giza, 12613, Egypt<br>E-mail: abdallaammar@agr.cu.edu.eg<br>ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9919-8760 | **Аммар Абдалла С. М.** — профессор, Кафедра науки о питании, Сельскохозяйственный факультет, Каирский Университет<br>12613, Египет, Гиза, ул. Гамаа<br>E-mail: abdallaammar@agr.cu.edu.eg<br>ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9919-8760 |
| **Youssef M. Riyad**, Professor, Food Science Department, Faculty of Agriculture, Cairo University<br>Gamaa Street, Giza, 12613, Egypt<br>E-mail: yriyad74@yahoo.com<br>ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1782-1599 | **Рияд Юсеф М.** — профессор, Кафедра науки о питании, Сельскохозяйственный факультет, Каирский Университет<br>12613, Египет, Гиза, ул. Гамаа<br>E-mail: yriyad74@yahoo.com<br>ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1782-1599 |
| **Mohamed I. Younis**, Teaching Assistant, Food Science Department, Faculty of Agriculture, Cairo University<br>Gamaa Street, Giza, 12613, Egypt<br>E-mail: mohamedyounis2201@agr.cu.edu.eg<br>ORCID: https://orcid.org/0009-0000-4421-4885 | **Юнис Мохамад И.** — Ассистент преподавателя, Кафедра науки о питании, Сельскохозяйственный факультет, Каирский Университет<br>12613, Египет, Гиза, ул. Гамаа<br>E-mail: mohamedyounis2201@agr.cu.edu.eg<br>ORCID: https://orcid.org/0009-0000-4421-4885 |
| **Marwa R. Ali**, Associate Professor, Food Science Department, Faculty of Agriculture, Cairo University<br>Gamaa Street, 12613, Giza, Egypt<br>E-mail: marwa3mrf@agr.cu.edu.eg<br>ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7399-1277<br>* corresponding author | **Али М. Р.** — адъюнкт-профессор, Кафедра науки о питании, Сельскохозяйственный факультет, Каирский Университет<br>12613, Египет, Гиза, ул. Гамаа, 1<br>E-mail: marwa3mrf@agr.cu.edu.eg<br>ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7399-1277<br>* автор для контактов |
| **Contribution** | **Критерии авторства** |
| Authors are 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/10.21323/2618-9771-2025-8-3-414-422

Received 19.04.2025
Accepted in revised 19.09.2025
Accepted for publication 24.09.2025
© Refat F. Al-Z., Ali A. O., Morsy N. F.S., Hammad K. S. M., 2025

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

# UTILIZATION OF RESIDUES OF AJWAIN, SUMMER SAVORY AND OREGANO ESSENTIAL OILS DISTILLATION

Fatma Al-Zahraa Refat[1], Afaf O. Ali[1], Nashwa F. S. Morsy[2] *, Karima S. M. Hammad[2]

[1] Regional Center for Food and Feed, Agricultural Research Center, Giza, Egypt
[2] Food Science Department, Faculty of Agriculture, Cairo University, Egypt

*KEY WORDS:*
*water distillation, water residue, solid residue, phenolic and flavonoid compounds, antioxidant and antibacterial*

ABSTRACT

Water distillation (WD) is a traditional technique for extracting essential oils (EOs). This technique yields significant amounts of water residue (WR) and solid residue (SR) as by-products. The goal of this study was to examine the effectiveness of using WR and SR by-products as antioxidant and antimicrobial agents. The chemical profile of EOs extracted from some aromaticplants rich in phenolic compounds (ajwain, summer savory and oregano) was analyzed by Gas Chromatography-Mass Spectrometry (GC–MS). The most abundant compounds were phenolic monoterpenes, such as thymol and carvacrol. The polyphenol characteristics of the analysed WR and SR extracts were defined by High Performance Liquid Chromatography (HPLC). The HPLC analysis indicated the presence of chlorogenic acid, catechin, ρ-hydroxy benzoic acid, ferulic acid, rutin and hesperidin as major components in WR. Total phenolic and total flavonoid contents were determined using Folin-Ciocalteu and aluminum chloride assays, respectively. The antioxidant potential was evaluated by 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) and ferric-reducing antioxidant power (FRAP) assays. The WRO (water residue from oregano) and WRS (water residue from savory) extracts exhibited higher DPPH radical scavenging activity and reducing power than butylated hydroxytoluene (BHT). The antibacterial activity of WR and SR extracts was evaluated on the example of their efficiency against six bacterial strains. The antibacterial activity of WRO extract against *Salmonella typhimurium* 14028 and *Serratia marcescens* 37 exceeded those of the standard ampicillin. Meanwhile, WRS extract exhibited greater antibacterial activity than ampicillin against *Bacillus cereus* 33018.

ACKNOWLEDGEMENTS: The authors express their thanks to Prof. Samy Mohamed Galal, the professor in Food Science Department, Faculty of Agriculture, Cairo University, for his advice and support during the investigation.

Поступила 19.04.2025
Поступила после рецензирования 19.09.2025
Принята в печать 24.09.2025
© Рефат Ф. Аль-З., Али А. О., Морси Н. С. М., Хаммад К. С. М., 2025

https://www.fsjour.com/jour
Научная статья
Open access

# УТИЛИЗАЦИЯ ОСТАТКОВ ДИСТИЛЛЯЦИИ ЭФИРНЫХ МАСЕЛ АЖГОНА, ЧАБЕРА САДОВОГО И ОРЕГАНО

Рефат Ф. Аль-З.[1], Али А. О.[1], Морси Н. С. М. [2],* Хаммад К. С. М.[2]

[1] Региональный центр продовольствия и кормов, Центр сельскохозяйственных исследований, Гиза, Египет
[2] Кафедра науки о пище, Сельскохозяйственный факультет, Каирский университет, Гиза, Египет

*КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:*
*водная дистилляция, водный остаток, сухой остаток, фенольные и флавоноидные соединения, антиоксидантный и антибактериальный*

АННОТАЦИЯ

Водная дистилляция (ВД) является традиционным методом экстракции эфирных масел (ЭМ). Этот метод даёт значительный объем водного остатка (ВО) и твёрдого остатка (ТО), получаемых в качестве побочных продуктов. Целью данного исследования было изучение эффективности использования побочных продуктов дистилляции, а именно — ВО и ТО в качестве антиоксидантных и антимикробных действующих веществ. Химический профиль ЭМ, экстрагированных из некоторых ароматических растений, богатых фенольными соединениями (ажгон, чабер садовый и орегано), был проанализирован с помощью метода газовой хроматографии-масс-спектрометрии (ГХ–МС). Наиболее часто встречающимися соединениями оказались фенольные монотерпены, такие как тимол и карвакрол. Полифенольные характеристики проанализированных ВО и ТО экстрактов были определены с помощью метода высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ). Анализ по методу ВЭЖХ показал присутствие хлорогеновой кислоты, катехина, ρ-гидроксибензойной кислоты, феруловой кислоты, рутина и гесперидина в качестве основных компонентов в ВО. Общее содержание фенольных соединений и флавоноидов определяли с помощью анализа Фолина-Чокальтеу и анализа на содержание хлорида алюминия соответственно. Антиоксидантный потенциал оценивали с помощью анализа 2,2-дифенил-1-пикрилгидразила (ДФПГ) и анализа восстанавливающей железо антиоксидантной активности (ВЖАА). Экстракты из водного остатка орегано (ВОО) и водного остатка чабера (ВОЧ) проявляли более высокую активность в отношении радикалов ДФПГ и восстанавливающую способность, нежели бутилированный гидрокситолуол (БГТ). Антибактериальная активность экстрактов ВО и ТО оценивалась на примере их эффективности в отношении шести штаммов бактерий. Антибактериальная активность экстракта ВОО в отношении *Salmonella typhimurium 14028* и *Serratia marcescens 37* превышала антибактериальную активность стандартного ампициллина. При этом экстракт ВОЧ проявлял более высокую антибактериальную активность, нежели ампициллин, в отношении *Bacillus cereus* 33018.

БЛАГОДАРНОСТИ: Авторы выражают благодарность проф. Сами Мохамеду Галалу — профессору кафедры науки о пище, Сельскохозяйственного факультета, Каирского университета, за его консультацию и поддержку во время исследования.

FOR CITATION: **Refat, F. Al-Z., Ali, A. O., Morsy, N. F. S., Hammad, K. S. M.** (2025). Utilization of residues of ajwain, summer savory and oregano essential oils distillation. *Food Systems,* 8(3), 414–422. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-3-414-422

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: **Рефат, Ф. Аль-З., Али, А. О., Морси, Н. С. М., Хаммад, К. С. М.** (2025). Утилизация остатков дистилляции эфирных масел ажгона, чабера садового и орегано. *Пищевые системы*, 8(3), 414–422. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-3-414-422

## 1. Introduction

WD is the most popularly utilized method to obtain EOs from the aromatic plants [1]. Large amounts of plant material are used in traditional distillation procedures for the extraction of essential oils, which in their turn generate residues that should be valorized and replenished rather than devalued and depleted [2]. The WD process produces two kinds of wastes: the aromatic water residue (the non-distilled aqueous phase or wastewater, often called decoction), in which the plant material was immersed [3] and the plant solid residue that is recovered at the end of distillation [4,5]. The WR is habitually discarded, though it may be rich in non-volatile phenolic compounds, which possess interesting biological properties [6]. A high quantity of solid residue rich in phenolics is left in the water, which constitutes a major problem for the EO industry [7]. Different methods are used to recover several valuable substances from these wastes such as polyphenols and polysaccharides [8–10]. Reducing "waste" to "secondary raw material" can resolve some or all of the environmental and economic problems [11]. Consequently, the recovery of the relevant substances with biological activities is considered in this industry [9]. Nowadays, the demand for natural-based products is increasing sharply [12]. Polyphenols have been proven to have positive antioxidant, antibacterial and anticancerous properties [13]. Using plant polyphenol-rich extracts is a promising trend in the food industry [14]. Polyphenols may show synergism with antibiotics [15].

Number of studies on the recovery of phenolic compounds from the by-products remaining after the essential oil distillation of aromatic plants are very limited [16,17].

Ajwain (*Trachyspermum ammi*) Sprague, syn. *Carum copticum* (L.) Link, is an aromatic herb belonging to the *Apiaceae* family [18]. This annual plant is growing in the East of India, Iran, Pakistan, and Egypt [19]. Its fruit (seeds) are widely used as a spice and food seasoning. Thymol is present in high concentration in ajwain EO. Depending on the concentration, these phenolic compounds act as either bacteriostatic or bactericidal agents [20].

Summer savory (*Satureja hortensis* L.) is a leafy spice. It belongs to the *Lamiaceae* family [21]. It has antimicrobial, antioxidant, anticancer, and anti-inflammatory properties because of its bioactive components such as carvacrol, thymol, ρ-cymene, and γ-terpinene [22].

One of the most well-known aromatic plants in the *Lamiaceae* family is oregano (*Origanum vulgare* L.) which has a distinct well-recognizable flavor [23,24]. Its essential oil is extracted from the leaves [25]. It is mainly composed of carvacrol and thymol [26]. It is used as an alternative to chemical preservatives due to its antioxidant and antimicrobial activities.

To the best of our knowledge, no information about the polyphenols profile, antioxidant and antibacterial properties of the ajwain and summer savory water distillation by-products is available. The aim of this work is to investigate the efficiency of these EO water distillation by-products as natural bioactive substances.

## 2. Materials and methods

### *2.1. Materials*

The dried fruits of ajwain (*Trachyspermum ammi*), and dried leaves of summer savory (*Satureja hortensis* L.) and oregano (*Origanum vulgare* L.) were purchased from Harraz Company for Medicinal Plants, Cairo, Egypt. The dried fruits and leaves were ground using a hammer mill to a fine powder. The antimicrobial study was conducted using three-gram positive bacterial strains (*Bacillus subtilis* 765 NRRL Northern Regional, *Bacillus cereus* 33018, *Staphylococcus aureus* 25923), and three-gram negative bacteria strains including *Salmonella typhimurium* 14028 Rockvill, Maryland, USA, *Escherichia coli* 15 and *Serratia marcescens* 37 FS (Food Science Department, Faculty of Agriculture, Cairo University).

### *2.2. Chemicals and reagents*

Folin-ciocalteu reagent, gallic acid, quercetin, DPPH, ferric chloride, butylated hydroxytoluene (BHT), anhydrous sodium sulphate, n-alkanes ($C_8$-$C_{24}$) and solvents of analytical and HPLC-grade were purchased from Sigma-Aldrich (St. Louis, MO, USA).

### *2.3. Extraction of essential oil and preparation of water residue*

Fifty grams of the investigated materials (ground to fine powder) were subjected to WD with distilled water using Clevenger apparatus for 3 h according to European Pharmacopoeia procedure [27]. At the end of extraction time, the obtained EO was dried over sodium sulphate anhydrous and stored in a dark glass bottle at 4 °C until conducting an analysis. The WD was performed for each plant material in triplicates. The mean value of the yield (%) was calculated on dry weight basis. The mixture of WR and SR was allowed to cool to room temperature and then was filtered under vacuum through a Whatman paper No. 1. The SR was air dried at room temperature up to constant weight and stored at 4 °C until usage.

A portion of the separated WR was stored in dark vials at −20 °C and used for the determination of polyphenols content and antioxidant activity. The other portion was concentrated under reduced pressure using a rotary evaporator N-1000 (EYELA, Japan) at 40 °C before freeze-drying (Modulyo Freeze Dryer, Edward, England) prior to HPLC analysis and antimicrobial activity examination.

### *2.4. Extraction of solid residue*

Solid residue dried samples were extracted with 80 % ethanolic solution at a ratio of 1:20 (*w/v*) using a high-speed Heidolph homogenizer (Type DR22054, Germany) for 30 min as reported by Helmy et al. [28]. After filtration, the solvent was removed in a rotary evaporator N-1000 (EYELA, Japan) under vacuum at 40 °C and the concentrated extract was stored at −20 °C for further analysis.

### *2.5. Essential oil analysis by GC–MS*

The GC–MS (TRACE GC Ultra Gas Chromatograph, THERMO Scientific Corp., USA) was used to assess the volatile substances profile of ajwain, summer savory, and oregano EOs as described by Morsy and Hammad [29]. Identification was performed by retention index (RI) in reference to n-alkanes ($C_8$-$C_{24}$), MS spectra, which were compared with spectra from the NIST library. The percentage composition of the volatiles was calculated using the normalization method and the GC peak areas.

### *2.6. Total phenolic and flavonoid contents*

The WR and SR extracts were analyzed spectrophotometrically for total phenolic content (TPC) using the Folin-Ciocalteu reagent as described by Gulluce et al. [30]. Absorbance was measured at 750 nm. Gallic acid was used as a reference standard. The results were expressed as mg of gallic acid equivalent (GAE)/g dry weight of the extracted material. Total flavonoid content (TFC) of the investigated samples was determined using the colorimetric aluminum chloride method according to Zhishen et al. [31]. Absorbance was measured at 510 nm. The results are expressed in mg of quercetin equivalent (QE)/g of dry weight of the extracted material.

### *2.7. Antioxidant activity*

#### *2.7.1. DPPH assay*

The DPPH radical scavenging activity of the various extracts was assessed as described by Pereira et al. [32]. The disappearance of DPPH was detected spectrophotometrically Unico UV-2000 Spectrophotometer (United Products and Instruments, USA) at 517 nm. BHT was used as a standard. The $IC_{50}$ value is the concentration of the extract required to reduce 50 % of DPPH radicals.

#### *2.7.2. FRAP assay*

FRAP was determined at 700 nm in the investigated samples according to the method of Vijayalakshmi and Ruckmani [33] using spectrophotometer. BHT was used as a positive control sample of the assay. The $IC_{50}$ values of various samples were determined as the concentration of the extracts in which the absorbance reaches the 0.5 value.

### *2.8. Antibacterial capacity*

The antibacterial activity of ajwain, summer savory and oregano WD wastes (lyophilized WR and SR ethanolic extracts) was determined using the well diffusion method according to Sağdiç [34]. Before the determination of antimicrobial activity, 0.1 g of the freeze-dried WR was dissolved in 5 mL distilled water. The antibacterial activity of the extracts was tested against gram-positive bacteria (*Bacillus subtilis* 765 NRRL Northern Regional, *Bacillus cereus* 33018 and *Staphylococcus aureus* 25923), and gram-negative bacteria (*Salmonella typhimurium* 14028 Rockvill, Maryland, USA, *Escherichia coli* 15 and *Serratia marcescens* 37 FS). 0.1 mL of each microorganism (1.0 x $10^7$ CFU/mL) was spread over the surface of plate count agar medium (Oxoid, England). Wells (5 mm in diameter) were filled with 50 µL of the samples with test LAB strains. Plates were incubated at 37 °C for 48 h and ampicillin (10 µg/well) was used as a positive control sample [35]. The inhibition zones were measured in mm.

### *2.9. Statistical analyses*

All analyses were carried out in triplicate, except for GC–MS and HPLC (single determination). Statistical analysis was carried out using ANOVA and Tukey's test at $p < 0.05$ significance level, using XLSTAT.

## 3. Results and discussion

### *3.1. Chemical composition of ajwain, summer savory and oregano EOs defined by GC–MS*

The yields of ajwain, summer savory and oregano essential oils were equal to 2.2±0.06, 2.8±0.11 and 1.2±0.07 %, respectively (Table 1). These results are consistent with those found by Skubij and Dzida [36], Morsy et al. [37] and Manaa et al. [38]., respectively. GC–MS analysis of ajwain, summer

savory and oregano EOs revealed the presence of 16, 21 and 21 compounds, respectively, comprising > 99% of the total EO (Table 1 and Figure 1).

The chemical profile of ajwain EO shows a predominant of oxygenated monoterpenes (particularly thymol as a phenolic monoterpene), followed by monoterpene hydrocarbons, and then oxygenated sesquiterpene. The aromatic constituents in ajwain EO were composed mainly of thymol (65.12%), ρ-cymene (27.15%) and γ-terpinene (5.65%), while carvacrol was present in a scant amount (0.13%). This result is in agreement with the result obtained by Anwar et al. [39], Saadat et al. [40] and Das et al. [41]. Other studies have reported different percentages of these components due to the geographical location and collocation time [42].

The identified volatile components in summer savory essential oil were mainly oxygenated monoterpenes. The predominant summer savory EO compounds were carvacrol (81.86%), γ-terpinene (4.20%), thymol (3.64%), ρ-cymene (3.12%) and trans-β-caryophyllene (2.95%). Summer savory is an important herb due to eminent components of its essential oil (EO) like carvacrol, γ-terpinene, *p*-cymene, and thymol [43,44]. Carvacrol acts as a quality index in summer savory essential oil quality assessment [45].

Table 1. **Volatile components relative percentage (%)[1] of ajwain (A), summer savory (S) and oregano (O) obtained by HD and detected by GC–MS**

Таблица 1. **Относительное процентное содержание летучих компонентов (%)[1] ажгона (A), чабера садового (S) и орегано (O), полученных методом водной дистилляции и обнаруженных по методу ГХ–МС**

| Compounds | RI[2] | A | S | O |
|---|---|---|---|---|
| Monoterpenes hydrocarbons | | | | |
| α-Thujene | 931 | 0.04 | 0.37 | 0.07 |
| α-Pinene | 939 | 0.21 | 0.36 | 0.11 |
| Camphene | 956 | ND | 0.05 | 0.06 |
| β-Pinene | 980 | 0.55 | 0.07 | ND |
| β-Myrcene | 991 | 0.11 | 0.65 | 0.13 |
| α-Phellandrene | 1005 | ND | 0.21 | ND |
| Δ-3-Carene | | 0.05 | ND | ND |
| α-Terpinene | 1018 | 0.07 | 0.87 | 0.30 |
| ρ-Cymene | 1026 | 27.15 | 3.12 | 1.90 |
| R (+)-Limonene | 1033 | 0.05 | ND | ND |
| Ɣ-Terpinene | 1048 | 5.65 | 4.20 | 1.28 |
| Cis-Sabinene hydrate | 1068 | ND | 0.15 | ND |
| Trans-Sabinene hydrate | 1072 | ND | 0.10 | 0.09 |
| **Oxygenated monoterpenes** | | | | |
| Cis-Limonene oxide | 1079 | 0.12 | ND | ND |
| Terpinolene | 1088 | ND | 0.10 | 0.08 |
| Endo-Borneol | 1167 | ND | 0.05 | 0.66 |
| Terpinen-4-ol | 1177 | 0.12 | 0.31 | 0.38 |
| α-Terpineol | 1188 | 0.09 | 0.12 | 0.09 |
| D-Carvone | 1252 | ND | ND | 0.10 |
| Bornyl acetate | 1285 | 0.03 | ND | ND |
| Thymol | 1419 | 65.12 | 3.64 | 1.26 |
| Carvacrol | 1430 | 0.13 | 81.86 | 89.34 |
| **Sesquiterpenes hydrocarbons** | | | | |
| Alloaromadendrene | 1432 | ND | ND | 0.14 |
| α-Humulene | 1454 | ND | 0.19 | 0.13 |
| Trans-β-caryophyllene | 1468 | ND | 2.95 | 2.39 |
| Ledene | 1489 | ND | ND | 0.12 |
| Oxygenated sesquiterpenes | | | | |
| β-Bisabolene | 1510 | ND | 0.10 | 0.24 |
| Caryophyllene oxide | 1581 | ND | 0.20 | 0.58 |
| (+) Spathulenol | 1585 | 0.15 | ND | ND |
| Total oxygenated compounds (%) | | 65.76 | 86.38 | 92.73 |
| Total non-oxygenated compounds (%) | | 33.88 | 13.29 | 6.72 |
| Monoterpenes Hydrocarbons | | 33.88 | 10.15 | 3.94 |
| Oxygenated Monoterpenes | | 65.61 | 86.08 | 91.91 |
| O/H ratio[3] | | 1.94 | 8.48 | 23.33 |
| Total identified compounds (%) | | 99.64 | 99.67 | 99.45 |
| % yield | | 2.2±0.06 | 2.8±0.11 | 1.2±0.07 |

[1] Relative area percent (peak area relative to total peak area).
[2] Retention indices (RI) using a TR-5MS column.
[3] O/H ratio represented Oxygenated monoterpenes/Monoterpenes hydrocarbons
ND = not detected.

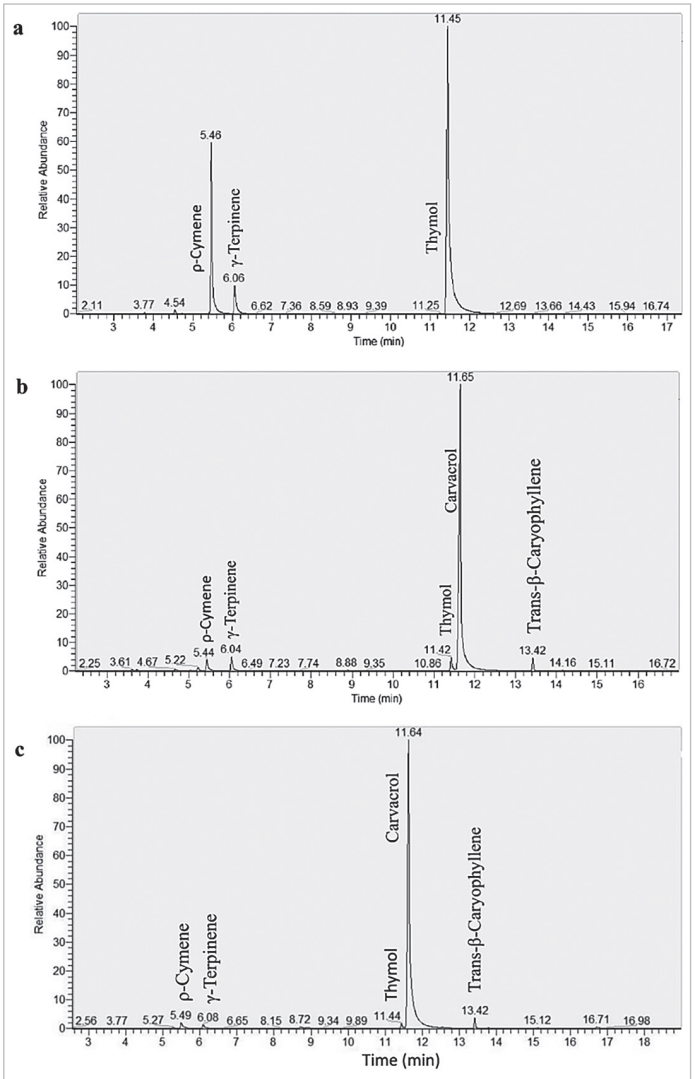



Figure 1. **GC–MS chromatograms of volatile constituents of a: ajwain, b: summer savory and c: oregano**

Рисунок 1. **ГХ–МС хроматограммы летучих компонентов a: ажгона, b: чабера садового и c: орегано**

The main identified constituents in oregano EO were carvacrol as monoterpenoid polyphenol (89.34%), trans-β-caryophyllene (2.39%), ρ-cymene (1.90%), γ-terpinene (1.28%) and thymol (1.26%). These results are consistent with the findings of Meerasri et al. [46].

The concentration ratio of oxygenated monoterpenes to monoterpene hydrocarbons (O/H ratio) in the essential oils of ajwain, summer savory and oregano were approximately 1.94:1, 8.48:1 and 23.33:1 based on the GC–MS analysis results (Table 1). It is important to highlight that oxygenated monoterpenes are more valuable and have a stronger odor than monoterpene hydrocarbons [47].

### *3.2. Total phenolic and flavonoid contents*

TPC and TFC (total flavonoid content) of the investigated extracts are illustrated in the Figure 2. Statistical analysis showed that the highest TPC (50.3±0.48 mg GAE/g DM) was recorded for the water residue obtained from summer savory (WRS), followed by the water residue obtained from oregano (WRO) (39.3±0.30 mg GAE/g DM). The efficient recovery of antioxidant phenolic components from oregano was achieved with 1:20 g/mL [48].

Meanwhile, the TPCs of the water residue obtained from ajwain (WRA) processing, the solid residues obtained from summer savory (SRS) and the solid residue from oregano (SRO) were not significantly different (p>0.05). The lowest TPC was noticed in the solid residue from ajwain (SRA) (3.5±0.01 mg GAE/g DM). However, the highest TFC was found in the WRO (45.5±0.39 mg QE/g DM), followed by the WRS (32.3±0.03 mg QE/g DM), SRS (17.6±0.03 mg QE/g DM), and the WRA (11.1±0.31 mg QE/g DM). The lowest levels of TFC were recorded for SRA and SRO without significant ($p>0.05$) difference. Irakli et al. [49] found that TPC and TFC values of oregano solid residue ethanolic extract were equal to 90.49 mg GAE/g and >125 mg CATE/g, respectively. Mishra et

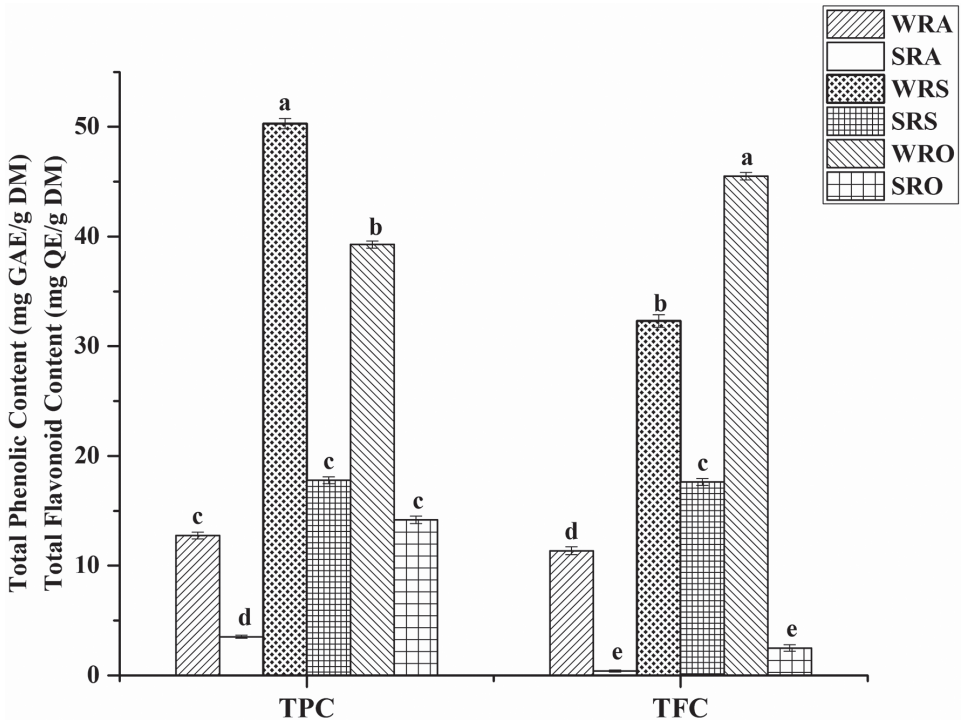



Figure 2. **Total phenolic content (mg GAE/g dried material) and total flavonoid content (mg QE/g dried material) from the water distilled by-products. WRA: water residue from ajwain, WRS: water residue from summer savory, WRO: water residue from oregano, SRA: solid residue from ajwain, SRS: solid residue from summer savory and SRO: solid residue from oregano. The values refer to mean ± standard deviations (SD) of three parallel measurements**

Рисунок 2. **Общее содержание фенолов (мг. экв. ГК/г сухого материала) и общее содержание флавоноидов (мг. в КЭ/г сухого материала), содержащихся в побочных продуктах, полученных путем водной дистилляции. ВОА: водный остаток ажгона, ВОЧ: водный остаток чабера садового, ВОО: водный остаток орегано, ТОА: твердый остаток ажгона, ТОЧ: твердый остаток чабера садового и ТОО: твердый остаток орегано. Значения равны среднему значению результатов трех параллельных измерений ± стандартное отклонение (SD)**

al. [50] reported that TPC of the aqueous ajwain extracts was found to be 6.2 ± 0.4 g GAE/100 g dried extract. TFC in the WR of ajwain seeds was equal to 0.04 mg QE/g DWW [19].

### *3.3. HPLC of polyphenols*

Compared to the SR extracts, the WR residue possessed a higher content of phenolic compounds. The longer Clevenger system distillation duration is thought to promote both the breakdown of more labile polyphenols and the leaching of less soluble polyphenols into the DWW [51].

Some phenolic compounds could be solubilized and discarded in the wastewater used for the hydrodistillation thus changing the phenolic composition of the nondistilled plant [52]. Results are presented in the Table 2. Chlorogenic acid, catechin, vanillic acid, ρ-hydroxybenzoic acid, ferulic acid, syringic acid, and caffeic acid were the main phenolic compounds found in WRA. The lowest phenolic components found in SRA were ferulic acid, chlorogenic acid, syringic acid and caffeic acid. The predominant phenolic components in WRS were catechin, syringic acid, chlorogenic acid, ρ-hydroxybenzoic acid, vanillic acid, caffeic acid,

Table 2. **Polyphenol compounds identified in the investigated by-products**

Таблица 2. **Полифенольные соединения, обнаруженные в исследуемых побочных продуктах**

| Compounds | (μg/mL) | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | WRA | SRA | WRS | SRS | WRO | SRO |
| **Phenolic compounds** | | | | | | |
| **Catechol** | ND | ND | 234.63 | 25.73 | ND | ND |
| ***p*-Hydroxy benzoic acid** | 271.25 | ND | 831.52 | ND | 352.17 | ND |
| **Chlorogenic acid** | 781.51 | 2.21 | 2320.71 | 14.00 | 106.60 | 19.41 |
| **Vanillic acid** | 274.16 | ND | 559.00 | ND | 253.72 | ND |
| **Caffeic acid** | 43.45 | 1.23 | 404.35 | ND | 37.78 | ND |
| **Syringic acid** | 60.81 | 1.31 | 3523.47 | 6.65 | 108.98 | 34.72 |
| ***p*-Coumaric acid** | ND | ND | 134.35 | ND | 92.89 | ND |
| **Ferulic acid** | 116.34 | 3.95 | 350.50 | 21.01 | 624.23 | 14.02 |
| ***o*-Coumaric acid** | 9.84 | ND | 16.22 | 3.95 | 37.92 | ND |
| **Flavonoid compounds** | | | | | | |
| **Catechin** | 277.85 | ND | 5744.63 | 13.42 | 1534.24 | 47.76 |
| **Resveratrol** | ND | 7.61 | 437.01 | 43.86 | 210.08 | ND |
| **Quercetin** | ND | ND | 3080.48 | 76.27 | 24324.16 | 120.06 |
| **Hesperidin** | 84.83 | 13.84 | 13841.74 | 115.73 | 227.10 | 132.66 |
| **Rosmarinic acid** | ND | ND | 1802.59 | 12.92 | 1207.43 | 16.76 |
| **Rutin** | 302.04 | ND | 321.21 | 9.61 | 42.78 | 2.69 |
| **Myricetin** | 34.77 | 2.23 | 119.81 | 6.44 | ND | 6.38 |
| **Apigenin** | 7.77 | 4.43 | 27.51 | 5.26 | 41.18 | 1.18 |

ND: not detected

ferulic acid, catechol and ρ-coumaric acid. The highest phenolic components in WRO were catechin, ferulic acid, ρ-hydroxybenzoic acid, vanillic acid, syringic acid and chlorogenic acid. Meanwhile, the SRO extract featured lower values of phenolic compounds (catechin, syringic acid, chlorogenic acid and ferulic acid) compared to the WRO. Meanwhile, the abundant phenolic compounds in WRO were catechin, ferulic acid, ρ-hydroxybenzoic acid, vanillic acid, syringic acid and chlorogenic acid. On the other hand, the phenolic constituents (catechin, syringic acid, chlorogenic acid and ferulic acid) of SRO extract were found in low values.

The predominant flavonoids in WRO, SRO, WRS and SRS were quercetin, rosmarinic acid, hesperidin, resveratrol, rutin. HPLC analysis revealed that rosmarinic acid is the dominant phenolic compound of hydrodistillation water residues of *Salvia* species [53].

The WR obtained from fresh basil, rosemary and sage is characterized by high level of rosmarinic acid [54].

Myricetin was not found in WRO. Resveratrol was not found in SRO. The lowest values of flavonoid compounds were found in WRA (rutin, hesperidin, myricetin and apigenin) and SRA (hesperidin, resveratrol, apigenin and myricetin).

The ajwain residues (both WRA and SRA) did not contain quercetin or rosmarinic acid. On the other hand, resveratrol was detected in the WRO but not in the SRO. Conversely, resveratrol was found in the SRA but was not detected in the WRA. Regarding myricetin, a similar picture was observed in both SRO and WRO.

### *3.4. Antioxidant activity*

The antioxidant activity of the investigated extracts was evaluated using DPPH assay (Figure 3). The WRO extract proved to be the most effective radical scavenger ($IC_{50}$ value = 2.95 µg GAE/mL), followed by the WRS ($IC_{50}$ value = 9.99 µg GAE/mL). Džamić et al. [55] reported that the water residue extract of *Hyssopus officinalis* L. subsp. Pilifer possessed higher antioxidant activity than its solid residue extract. Polyphenols with antioxidant properties, such rosmarinic acid, are found in Greek oregano [56]. Thymol and carvacrol were responsible for the radical scavenging activity [57–58].

Chizzola et al. [59] and Wollinger et al. [60] found that the wastewater obtained after distillation of from *Rosemary officinalis* and *Thymus vulgaris* had a lot more antioxidants than the solid residue and the undistilled plant. Similarly, Alice et al. [61] found that the wastewater of *O. vulgare* featured a greater TPC than the aqueous extract of the undistilled plant. Despite their normally low-to-medium solubility in water, phenols dissolve better in wastewater due to temperature increases and their capacity to form hydrogen bonds with water [62,63]. In general, the antioxidant efficiency of the extracts is related to their high content of TPC. This result is in agreement with the results of de Elguea-Culebras et al. [51]. The highest antioxidant characteristics are related to the content of polyphenols such as flavonoids [64,65].

Meanwhile, the radical scavenging activity of SRS and SRO ($IC_{50}$ value = ~ 35.42 µg GAE/mL) is close to that of BHT ($IC_{50}$ value = 38.1 µg/mL). European Commission considered the SR of *Rosemary officinalis* as a food preservative (code E-392) [66].

No DPPH radical scavenging activity was recorded for SRA. On the other hand, the lowest activity was recorded for WRA ($IC_{50}$ value = 60.05 µg GAE/mL). The lowest level of phenolic compounds caused poor DPPH radical-scavenging activity [52].

Dorman et al. [67] stated that the antioxidant activity determined by different assays are not correlated with TPC of the extracts. It is mainly related to the major phenolic component present in *Lamiaceae* extracts, rosmarinic acid.

A similar trend was observed in the FRAP assay. A lower $IC_{50}$ value means a higher antioxidant activity [68]. Data in the Figure 4 indicate that WRO and WRS showed higher reducing power ($IC_{50}$ values of 3.16 and 3.8 µg GAE/mL., respectively) compared to BHT ($IC_{50}$ value = 15.16 µg/mL), followed by WRA, SRS and SRO ($IC_{50}$ values of 30.40, 32.86 and 46.16 µg GAE/mL, respectively). These results indicated that WRO and WRS possess the efficiency to reduce the $Fe^{+3}$ to $Fe^{+2}$ as good chelators. On the other hand, SRA exhibited poor reducing power ($IC_{50}$ value = 105.26 µg GAE/mL).

In comparison to synthetic antioxidants, the value of natural resource-based antioxidants will grow with time. This means that the water residue from hydro distillation must be regarded as a co-product of the extraction process instead of being considered a waste product. This residue can be added to a target product to increase its antioxidant activity or re-extracted to obtain pure antioxidants [57].

Mielnik et al. [69] reported that the antioxidants in WR can be used to keep stored meat products from turning rancid.

### *3.5. Antibacterial activity*

Many aromatic plants or their oils were effective against the growth of several foodborne bacteria [70]. The antimicrobial activity of the investigated extracts was evaluated per their antimicrobial efficiency against the tested bacteria (Table 3).

As reported by el Hassouni et al. [71], the antibacterial activity of extracts can be divided into 3 categories according to the inhibition zone (iz): weak activity (iz ⩽12 mm), moderate activity (iz from >12.0 to <20 mm) and strong activity (iz ⩾20 mm).

The antibacterial properties of WRA and WRS were significantly ($p<0.05$) superior in comparison to their counterparts of solid residue extracts against *Bacillus cereus* 33018 and *Staphylococcus aureus* 112. The same trend was also noticed for WRS and WRO extracts against *Escherichia coli* 15 and *Serratia marcescens* 37. The highest antibacterial activity of the investigated extracts against *Bacillus subtilis* 765 NRRL and *Salmonella typhimurium* 14028 was recorded in WRO. The antibacterial activity of WRO extract against *Salmonella typhimurium* 14028 and *Serratia marcescens* 37 exceeded those of the standard ampicillin. Meanwhile, WRS extract exhibited greater antibacterial activity than ampicillin against *Bacillus cereus 33018.* This WR is regarded as bioactive compounds with high antobacterial value [35].

On the other hand, the SRO showed moderate antibacterial activity at both $G^+$ and $G^-$ bacteria, whereas SRS showed weak to moderate antibacterial activity. According to Pandey and Rizvi [72], rosmarinic acid features several intriguing biological properties, including antiviral, antibacterial, anti-inflammatory, and antioxidant properties. Catechins provides bactericidal effects on gram-positive and gram-negative bacteria [73].

## 4. Conclusion

Our study demonstrated that hydrodistilled water residue is a better source of phenolic compounds than the solid residue. Water residue obtained after hydrodistillation featured remarkably higher antioxidant and antibacterial activities than the insoluble residue extracts. Therefore, the wastewater obtained as a distillation by-product can be utilized as a natural source of bioactive compounds with potential applications as antioxidants and preservatives in food, cosmetics and medicine industries.

Table 3. **The antibacterial activity* of the investigated extracts**
Таблица 3. **Антибактериальное действие* исследуемых экстрактов**

| Microorganisms | WRA | SRA | WRS | SRS | WRO | SRO | Ampicillin (10 µg) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Gram Positive Bacteria** | | | | | | | |
| *Bacillus subtilis* 765 NRRL | $23.00^{bB} \pm 1.00$ | $20.67^{aB} \pm 1.53$ | $8.33^{dC} \pm 1.53$ | $12.67^{abC} \pm 3.06$ | $24.00^{cB} \pm 1.00$ | $12.67^{bC} \pm 1.53$ | $33.33^{aA} \pm 1.53$ |
| *Bacillus cereus* 33018 | $24.00^{bB} \pm 2.00$ | $14.33^{bC} \pm 1.53$ | $28.00^{aA} \pm 1.00$ | $12.00^{abCD} \pm 1.00$ | $14.00^{eC} \pm 1.00$ | $12.00^{bCD} \pm 1.00$ | $8.67^{cD} \pm 1.53$ |
| *Staphylococcus aureus* 112 | $29.00^{aB} \pm 1.00$ | $13.67^{bD} \pm 1.53$ | $23.00^{bC} \pm 2.00$ | $9.00^{cE} \pm 1.00$ | $17.00^{dD} \pm 1.00$ | $15.00^{abD} \pm 1.00$ | $35.00^{aA} \pm 1.00$ |
| **Gram Negative Bacteria** | | | | | | | |
| *Salmonella typhimurium* 14028 | $14.00^{dDE} \pm 1.00$ | $16.00^{bCD} \pm 1.53$ | $17.00^{cC} \pm 1.00$ | $12.00^{abE} \pm 1.00$ | $32.00^{aA} \pm 1.00$ | $14.00^{bDE} \pm 1.00$ | $25.37^{bB} \pm 0.96$ |
| *Escherichia coli* 15 | $17.67^{cCD} \pm 1.53$ | $13.00^{bDE} \pm 1.00$ | $21.67^{bB} \pm 2.08$ | $11.00^{abE} \pm 1.00$ | $17.00^{dBC} \pm 1.00$ | $13.00^{bDE} \pm 1.00$ | $35.33^{aA} \pm 2.08$ |
| *Serratia marcescens* 37 | $17.00^{cdCD} \pm 1.00$ | $20.00^{aBC} \pm 1.00$ | $20.00^{bcBC} \pm 1.00$ | $15.00^{aD} \pm 1.00$ | $27.00^{bA} \pm 1.00$ | $18.00^{aCD} \pm 1.00$ | $22.33^{bB} \pm 1.53$ |

* Mean zone of inhibition in mm include well diameter (5 mm) ± Standard deviation (SD) where $n=3$. Means followed by different lowercase letters in the same column and uppercase letters in the same row indicate significant differences at $p<0.05$.

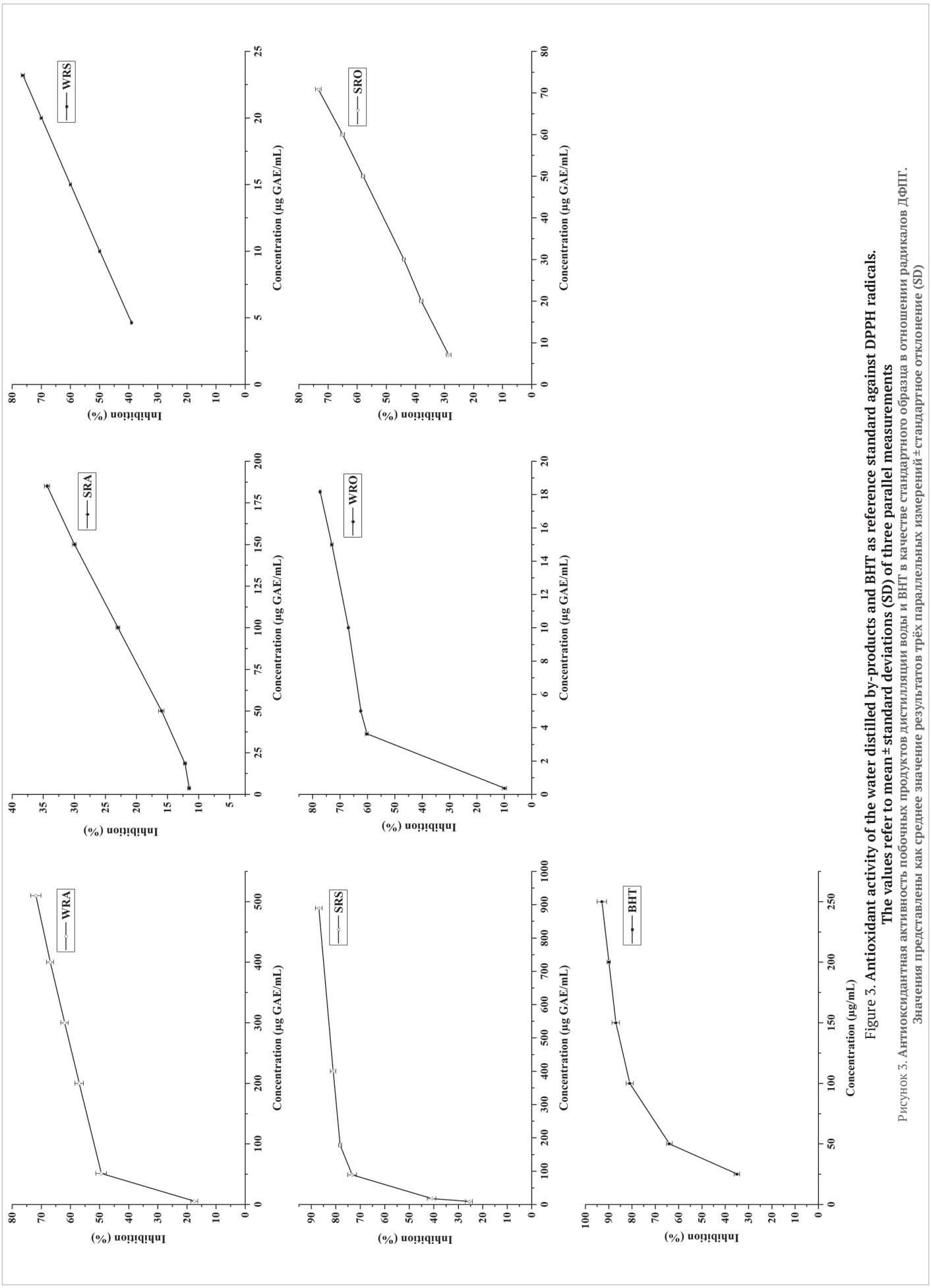



Figure 3. **Antioxidant activity of the water distilled by-products and BHT as reference standard against DPPH radicals. The values refer to mean ± standard deviations (SD) of three parallel measurements**

Рисунок 3. **Антиоксидантная активность побочных продуктов дистилляции воды и BHT в качестве стандартного образца в отношении радикалов ДФПГ. Значения представлены как среднее значение результатов трёх параллельных измерений ± стандартное отклонение (SD)**

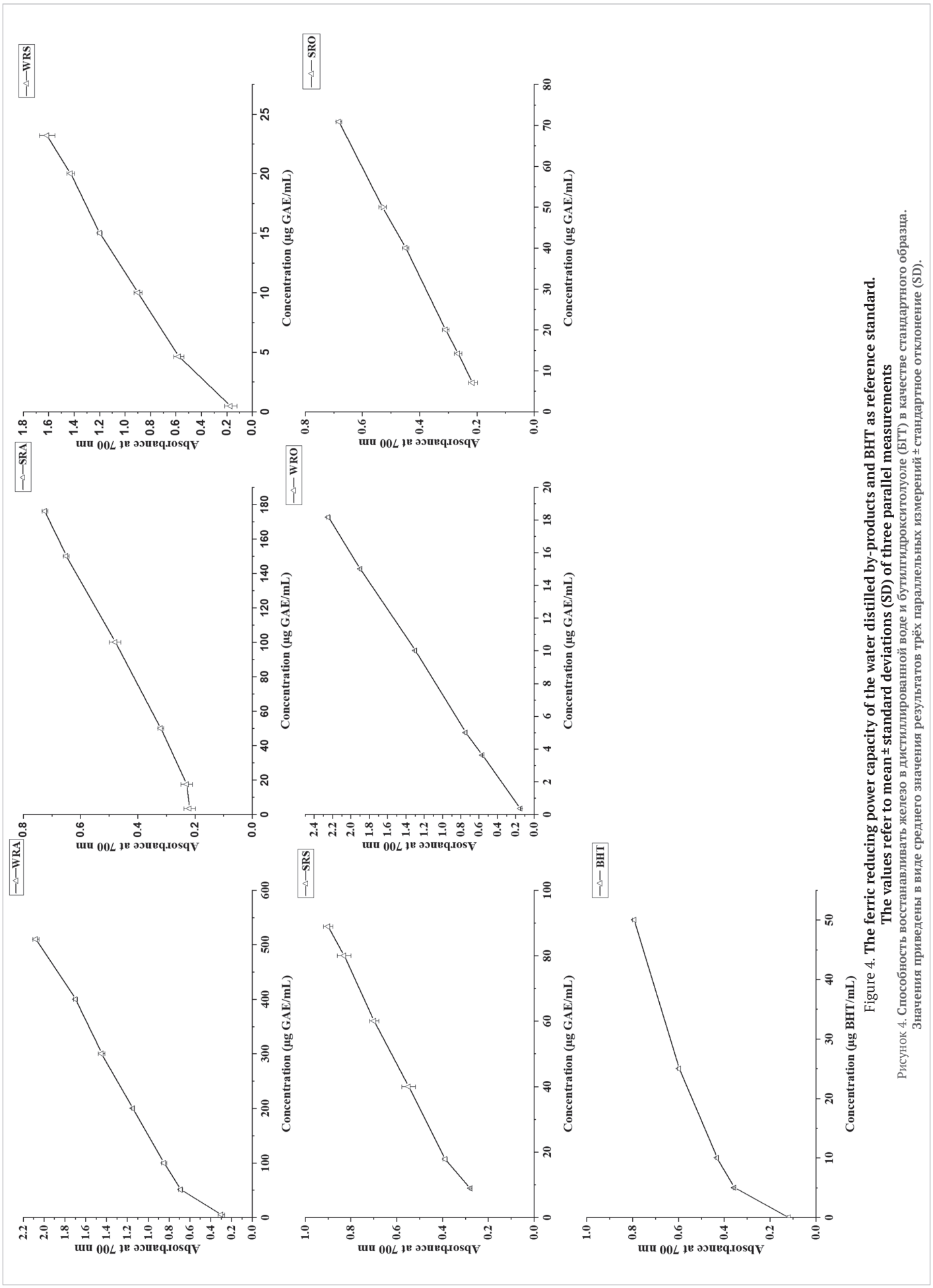



Figure 4. **The ferric reducing power capacity of the water distilled by-products and BHT as reference standard. The values refer to mean± standard deviations (SD) of three parallel measurements**

Рисунок 4. **Способность восстанавливать железо в дистиллированной воде и бутилгидроксиголуоле (БГТ) в качестве стандартного образца. Значения приведены в виде среднего значения результатов трёх параллельных измерений ± стандартное отклонение (SD).**

## REFERENCES


1. Katekara, V. P., Rao, A. B., Sardeshpande, V. R. (2023). A hydrodistillation-based essential oils extraction: A quest for the most effective and cleaner technology. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 36, Article 101270. https://doi.org/10.1016/j.scp.2023.101270
2. Dhouibi, N., Binous, H., Dhaouadi, H., Dridi-Dhaouadi, S. (2020). Hydrodistillation residues of *Centaurea nicaeensis* plant for copper and zinc ions removal: Novel concept for waste re-use. *Journal of Cleaner Production*, 261(3), Article 121106. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121106
3. Rodrigues, L., Coelho, E., Madeira, R., Teixeira, P., Henriques, I., Coimbra, M. A. (2022). Food ingredients derived from lemongrass byproduct hydrodistillation: Essential oil, hydrolate, and decoction. *Molecules*, 27(8), Article 2493. https://doi.org/10.3390/molecules27082493
4. Napoli, E., Dattilo, S., Ruberto, G. (2020). Hydrodistillation of *Trachelospermum jasminoides* Lindl. Flowers. An analysis of essential oil, hydrolate and polyphenols content of the process wastes. *Journal of Essential Oil Research*, 32(6), 556–561. https://doi.org/10.1080/10412905.2020.1808538
5. Gonzalez-Rivera, J., Campanella, B., Pulidori, E., Bramanti, E., Tiné, M. R., Bernazzani, L. et al. (2023). From volatiles to solid wastes: Towards the full valorization of lavender and rosemary by simultaneous in situ microwaves and ultrasounds irradiation extraction. *Industrial Crops and Products*, 194, Article 116362. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.116362
6. Alves-Silva, J. M., Guerraa, I., Gonçalvesa, M. J., Cavaleiroa, C., Cruzc, M. T., Figueirinha, A. et al. (2020). Chemical composition of *Crithmum maritimum* L. essential oil and hydrodistillation residual water by GC–MS and HPLC-DAD-MS/MS, and their biological activities. *Industrial Crops and Products*, 149, Article 112329. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112329
7. Skendi, A., Irakli, M., Chatzopoulou, P., Bouloumpasi, E., Biliaderis, C. G. (2022). Phenolic extracts from solid wastes of the aromatic plant essential oil industry: Potential uses in food applications. *Food Chemistry Advances*, 1, Article 100065. https://doi.org/10.1016/j.focha.2022.100065
8. Ozkan, G., Sagdiç, O., Baydar, N. G., Baydar, H. (2004). Note: Antioxidant and antibacterial activities of *Rosa damascene* flower extracts. *Food Science and Technology International*, 10(4), 277–281. https://doi.org/10.1177/1082013204045882
9. Slavov, A., Vasileva, I., Stefanov, L., Stoyanova, A. (2017). Valorization of wastes from the rose oil industry. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 16(2), 309–325. https://doi.org/10.1007/s11157-017-9430-5
10. Sabahi, Z., Farmani, F., Mousavinoor, E., Moein, M. (2020). Valorization of waste water of *Rosa amascene* oil distillation process by Ion Exchange Chromatography. *Hindawi Scientific World Journal*, 2020, Article 5409493. https://doi.org/10.1155/2020/5409493
11. Lamine, M., Hamdi, Z., Zemni, H., Rahali, F. Z., Melki, I., Mliki, A. et al. (2024). From residue to resource: The recovery of high-added values compounds through an integral green valorization of citrus residual biomass. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 37, Article 101379. https://doi.org/10.1016/j.scp.2023.101379
12. Ferraz, C. A., Sousa, A. C. A., Caramelo, D., Delgado, F., de Oliveira, A. P., Pastorinho, M. R. (2022). Chemical profile and eco-safety evaluation of essential oils and hydrolates from *Cistus ladanifer*, *Helichrysum italicum*, *Ocimum basilicum* and *Thymbra capitata*. *Industrial Crops and Products*, 175, Article 114232. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.114232
13. Lourenço Neto, M., Agra, K. L., Suassuna Filho, J., Jorge, F. E. (2018). TDDFT calculations and photoacoustic spectroscopy experiments used to identify phenolic acid functional biomolecules in Brazilian tropical fruits in natura. *Spectrochimica Acta Part A, Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 193, 249–257. https://doi.org/10.1016/j.saa.2017.12.036
14. Coşkun, N., Sarıtaş, S., Bechelany, M., Karav, S. (2025). Polyphenols in foods and their use in the food industry: Enhancing the quality and nutritional value of functional foods. *International Journal of Molecular Sciences*, 26(12), Article 5806. https://doi.org/10.3390/ijms26125803
15. Olszewska, M.A., Gędas, A., Simoes, M. (2020). Antimicrobial polyphenol-rich extracts: Applications and limitations in the food industry. *Food Research International*, 134, Article 109214. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109214
16. Oreopoulou, A., Papavassilopoulou, E., Bardouki, H., Vamvakias, M., Bimpilas, A., Oreopoulou, V. (2018). Antioxidant recovery from hydrodistillation residues of selected Lamiaceae species by alkaline extraction. *Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants*, 8, 83–89. https://doi.org/10.1016/j.jarmap.2017.12.004
17. Rocha-Guzmán, N. E., Gallegos-Infante, J. A., Gonzàlez-Laredo, R. F., Ramos-Gómez, M., Rodríguez-Mu˜noz, M. E., Reynoso-Camacho, R. et al. (2007). Antioxidant effect of oregano (*Lippia berlandieri* v. Shauer) essential oil and mother liquors. *Food Chemistry*, 102(1), 330–335. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2006.05.024
18. Seidemann, J. (2005). World spice plants. Heidelberg, Germany: Springer-Verlag, 2005.
19. Dhaiwal, K., Chahal, K. K., Kataria, D., Kumar, A. (2017). Gas chromatography-mass spectrometry analysis and in vitro antioxidant potential of ajwain seed (*Trachyspermum ammi* L.) essential oil and its extracts. *Journal of Food Biochemistry*, 41(3), Article e12364. https://doi.org/10.1111/jfbc.12364
20. Zarshenas, M. M., Moein, M., Mohammadi Samani, S., Petramfar, P. (2014). An overview on ajwain (*Trachyspermum ammi*) pharmacological effects; modern and traditional. *Journal of Natural Remedies*, 14(1), 98–105.
21. Hamidpour, R., Hamidpour, S., Hamidpour, M., Shahlari, M., Sohraby, M. (2014). Summer savory: From the selection of traditional applications to the novel effect in relief, prevention, and treatment of a number of serious illnesses such as diabetes, cardiovascular disease, Alzheimer's disease, and cancer. *Journal of Traditional and Complementary Medicine*, 4(3), 140–144. https://doi.org/10.4103/2225-4110.136540
22. Bumedi, F., Aran, M., Miri, M. A., Seyedabadi, E. (2023). Preparation and characterization of zein electrospun fibers loaded with savory essential oil for fruit preservation. *Industrial Crops and Products*, 203, Article 117121. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.117121
23. Smaoui, S., Hsouna, A. B., Lahmar, A., Ennouri, K., Mtibaa-Chakchouk, A., Sellem, I. et al. (2016). Bio-preservative effect of the essential oil of the endemic *Mentha piperita* used alone and in combination with bacTN635 in stored minced beef meat. *Meat Science*, 117, 196–204. https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2016.03.006
24. Lastra-Vargas, L., Hernández-Nava, R., Ruíz-González, N., Jiménez-Munguía, M. T., López-Malo, A., Palou, E. (2023). Oregano essential oil as an alternative antimicrobial for the control of *Listeria monocytogenes* and *Salmonella* in Turkey mortadella during refrigerated storage. *Food Chemistry Advances*, 2, Article 100314. https://doi.org/10.1016/j.focha.2023.100314
25. Kumar, V., Marković, T., Emerald, M., Dey, A. (2016). Herbs: Composition and dietary importance. Chapter in a book: Encyclopedia of Food and Health. Academic Press, 2016. https://doi.org/10.1016/b978-0-12-384947-2.00376-7
26. Hassoun, A., Emir Çoban, Ö. (2017). Essential oils for antimicrobial and antioxidant applications in fish and other seafood products. *Trends in Food Science and Technology*, 68, 26–36. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.07.016
27. European Pharmacopoeia (2004). 5th Edition. Directorate for the Quality of Medicines. Strasbourg Cedex, France.2004.
28. Helmy, S. A., Morsy, N. F. S., Elaby, S. M., Ghaly, M. A. H. (2024). Antidiabetic effect of green vegetable leaf powders in diabetic rats. *Egyptian Journal of Chemistry*, 67(4), 93–104. https://doi.org/10.21608/ejchem.2023.225687.8321
29. Morsy, N. F. S., Hammad, K. S. M. (2021). Extraction of essential oil from methyl cinnamate basil (*Ocimum canum* Sims) with high yield in a short time using enzyme pretreatment. *Journal of Food Science and Technology*, 58(7), 2599–2605. https://doi.org/10.1007/s13197-020-04766-y
30. Gulluce, M., Sahin, F., Sokmen, M., Ozer, H., Daferera, D., Sokmen, A. et al. (2007). Antimicrobial and antioxidant properties of the essential oils and methanol extract from *Mentha longifolia* L. ssp. *longifolia*. *Food Chemistry*, 103(4), 1449–1456. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2006.10.061
31. Zhishen, J., Mengcheng, T., Jianming, W. (1999). The determination of flavonoid contents in mulberry and their scavenging effects on superoxide radicals. *Food Chemistry*, 64(4), 555–559. https://doi.org/10.1016/S0308-8146(98)00102-2
32. Pereira, J.A., Oliveira, I., Sousa, A., Ferreira, I.C.F.R., Bento, A., Estevinho, L. (2008). Bioactive properties and chemical composition of six walnut (*Juglans regia* L.) cultivars. *Food and Chemical Toxicology*, 46(6), 2103–2111. https://doi.org/10.1016/j.fct.2008.02.002
33. Vijayalakshmi, M., Ruckmani, K. (2016). Ferric reducing anti-oxidant power assay in plant extract. *Bangladesh Journal Pharmacology*, 11, 570–572. https://doi.org/10.3329/bjp.v11i3.27663
34. Sağdiç, O. (2003). Sensitivity of four pathogenic bacteria to Turkish thyme and oregano. *LWT-Food Science and Technology*, 36(5), 467–473. https://doi.org/10.1016/S0023-6438(03)00037-9
35. Gerçek, Y. C., Bayram, S., Çelik, S., Canlı, D., Mavaldi, M. H., Boztas, K. et al. (2022). Characterization of essential oil and wastewater from *Thymusnummularius* M. Bieb. and micromorphological examination of glandular trichomes. *Journal of Essential Oil Bearing Plants*, 25(3), 690–706. https://doi.org/10.1080/0972060X.2022.2107403
36. Skubij, N., Dzida, K. (2019). Essential oil composition of summer savory (*Satureja hortensis* L.) cv. Saturn depending on nitrogen nutrition and plant development phases in raw material cultivated for industrial use. *Industrial Crops and Products*, 135, 260–270. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.04.057
37. Morsy, N. F.S. (2020). Production of thymol rich extracts from ajwain (*Carum copticum* L.) and thyme (*Thymus vulgaris* L.) using supercritical $CO_2$. *Industrial Crops and Products*, 145, Article 112072. http://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.112072
38. Manaa, A. O., Baghdadi, H. H., El-Nikhely, N. A., Heikal, L. A., El-Hosseiny, L. S. (2022). Oregano oil-nanoemulsions: Formulation and evaluation of antibacterial and anticancer potentials. *Journal of Drug Delivery Science and Technology*, 78, Article 103978. https://doi.org/10.1016/j.jddst.2022.103978
39. Anwar, S., Ahmed, N., Habibatni, S., Abusamra, Y. (2016). Ajwain (*Trachyspermum ammi* L.) oils. Chapter in a book: Essential Oils in Food Preservation, Flavor and Safety. Elsevier Inc., London, UK, 2016. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-416641-7.00019-5
40. Saadat, S., Rawtani, D., Braganza, V. (2022). Antimicrobial activity of chitosan film containing nanocomposite of *Trachyspermum ammi* (ajwain) seed oil loaded Halloysite nanotubes against foodborne pathogenic microorganisms. *Applied Clay Science*, 226, Article 106554. https://doi.org/10.1016/j.clay.2022.106554
41. Das, B. S., Sarangi, A., Rout, S. S., Sahoo, A., Giri, S., Bhattacharya, D. (2025). Antimycobacterial potential of *Trachyspermum ammi* seed essential oil via fume contact and determination of major compounds. *Natural Product Research*, 39(6), 1467–1473. https://doi.org/10.1080/14786419.2023.2300404
42. Zare, M. R., Khorram, M., Barzegar, S., Asadian, F., Zareshahrabadi, Z., Saharkhiz, M. J. et al. (2021). Antimicrobial cor — eshell electrospun nanofibers containing Ajwain essential oil for accelerating infected wound healing. *International Journal of Pharmaceutics*, 603, Article 120698. https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2021.120698
43. Alizadeh, A., Moghaddam, M., Asgharzade, A., Sourestani, M. M. (2020). Phytochemical and physiological response of *Satureja hortensis* L. to different irrigation regimes and chitosan application. *Industrial Crops and Products*, 158, Article 112990. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112990
44. Memari-Tabrizi, E. F., Yousefpour-Dokhanieh, A., Babashpour-Asl, M. (2021). Foliar-applied silicon nanoparticles mitigate cadmium stress through physiochemical changes to improve growth, antioxidant capacity, and essential oil profile of summer savory (*Satureja hortensis* L.). *Plant Physiology and Biochemistry*, 165, 71–79. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.04.040
45. Mohtashami, S., Rowshan, V., Tabrizi, L., Babalar, M., Ghani, A. (2018). Summer savory (*Satureja hortensis* L.) essential oil constituent oscillation at different storage conditions. *Industrial Crops and Products*, 111, 226–231. http://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.09.055
46. Meerasri, J., Sukatta, U., Rugthaworn, P., Klinsukhon, K., Khacharat, L., Sakayaroj, S. (2024). Synergistic effects of thyme and oregano essential oil combinations for enhanced functional properties of sericin/pectin film. *International Journal of Biological Macromolecules*, 263(Part 1), Article 130288. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.130288
47. Ferhat, M. A., Meklati, B. Y., Smadja, J., Chemat, F. (2006). An improved microwave clevenger apparatus for distillation of essential oils from orange peel. *Journal of Chromatography A*, 1112(1–2), 121–126. https://doi.org/10.1016/j.chroma.2005.12.030
48. Majeed, M., Hussain, A. I., Chatha, S. A. S., Khosa, M. K. K., Kamal, G. M., Kamal, M. A. et al. (2016). Optimization protocol for the extraction of antioxidant components from *Origanum vulgare* leaves using response surface methodology. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 23(3), 389–396. https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2015.04.010
49. Irakli, M., Skendi, A., Bouloumpasi, E., Chatzopoulou, P., Biliaderis, C. G. (2021). LC–MS identification and quantification of phenolic compounds in solid residues from the essential oil industry. *Antioxidants*, 10(12), Article 2016. https://doi.org/10.3390/antiox10122016
50. Mishra, P. K., Kakatkar, A. S., Gautam, R. K., Kumar, V., Debbarma, A., Chatterjee, S. (2023). Effect of ajwain (*Trachyspermum ammi*) extract and gamma irradiation on

the shelf-life extension of rohu (*Labeo rohita*) and seer (*Scomberomorus guttatus*) fish steaks during chilled storage. *Food Research International*, 163, Article 112149. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.112149
51. de Elguea-Culebras, G. O., Panamá-Tapia, L. A., Melero-Bravo, E., Cerro-Ibáñez, N., Calvo-Martínez, A., Sánchez-Vioque R. (2023). Comparison of the phenolic composition and biological capacities of wastewater from *Origanum vulgare* L., *Rosmarinus officinalis* L., *Salvia lavandulifolia* Vahl. and *Thymus mastichina* L. resulting from two hydrodistillation systems: Clevenger and MAE. *Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants*, 34, Article 100480. https://doi.org/10.1016/j.jarmap.2023.100480
52. Sánchez-Vioque, R., Izquierdo-Melero, M. E., Quílez, M., Herraiz-Peñalver, D., Santana-Méridas, O., Jordán, M. J. (2018). Solid residues from the distillation of *Salvia lavandulifolia* Vahl. as a natural source of antioxidant compounds. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 95(10), 1277–1284. https://doi.org/10.1002/aocs.12128
53. Cvetkovikj, I., Stefkov, G., Acevska, J., Petreska Stanoeva, J., Karapandzova, M., Stefova, M. et al. (2013). Polyphenolic characterization and chromatographic methods for fast assessment of culinary *Salvia* species from South East Europe. *Journal of Chromatography A*, 1282, 38–45. https://doi.org/10.1016/j.chroma.2012.12.068
54. Celano, R., Piccinelli, A., Pagano, I., Roscigno, G., Campone, L., DeFalco, E. et al. (2017). Oil distillation waste waters from aromatic herbs as new natural source of antioxidant compounds. *Food Research International*, 99(1), 298–307. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.05.036
55. Džamić, A. M., Soković, M. D., Novaković, M., Jadranin, M., Ristić, M. S., Tešević, V. et al. (2013). Composition, antifungal and antioxidant properties of *Hyssopus officinalis* L. subsp. pilifer (Pant.) Murb. essential oil and deodorized extracts. *Industrial Crops and Products*, 51, 401–407. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2013.09.038
56. Oreopoulou, A., Goussias, G., Tsimogiannis, D., Oreopouloub, V. (2020). Hydroalcoholic extraction kinetics of phenolics from oregano: Optimization of the extraction parameters. *Food and Bioproducts Processing*, 123, 378–389. https://doi.org/10.1016/j.fbp.2020.07.017
57. Momtaz, S., Abdollahi, M. (2010). An update on pharmacology of *Satureja* species: From antioxidant, antimicrobial, antidiabetes and anti-hyperlipidemic to reproductive stimulation. *International Journal of Pharmacology*, 6(4), 454–461. https://doi.org/10.3923/ijp.2010.346.353
58. Yanishlieva, N. V., Marinova, E. M., Gordon, M. H., Raneva, V. G. (1999). Antioxidant activity and mechanism of action of thymol and carvacrol in two lipid systems. *Food Chemistry*, 64(1), 59–66. https://doi.org/10.1016/s0308-8146(98)00086-7
59. Chizzola, R., Michitsch, H., Franz, C. (2008). Antioxidative properties of *Thymus vulgaris* leaves: Comparison of different extracts and essential oil chemotypes. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 56(16), 6897–6904. https://doi.org/10.1021/jf800617g
60. Wollinger, A., Perrin, É., Chahboun, J., Jeannot, V., Touraud, D., Kunz, W. (2016). Antioxidant activity of hydro distillation water residues from *Rosmarinus officinalis* L. leaves determined by DPPH assays. *Comptes Rendus Chimie*, 19(6), 754–765. https://doi.org/10.1016/j.crci.2015.12.014
61. Alice, G., Corina, B., Lucia, P., Sultana, N., Bazdoaca, C., Nicoleta, D. (2019). Polyphenol content dynamics in hydrodistillation water residues of lamiaceae species. *Journal of Essential Oil Bearing Plants*, 22(3), 858–864. https://doi.org/10.1080/0972060x.2019.1633417
62. Noubigh, A., Abderrabba, M., Provost, E. (2007). Temperature and salt addition effects on the solubility behaviour of some phenolic compounds in water. *The Journal of Chemical Thermodynamics*, 39(2), 297–303. https://doi.org/10.1016/j.jct.2006.06.014
63. Martins, M. A. R., Silva, L. P., Ferreira, O., Schröder, B., Coutinho, J. A. P., Pinho, S. P. (2017). Terpenes solubility in water and their environmental distribution. *Journal of Molecular Liquids*, 241, 996–1002. https://doi.org/10.1016/j.molliq.2017.06.099
64. Ragab, G. A., Saad-Allah, K. M. (2020). Green synthesis of sulfur nanoparticles using *Ocimum basilicum* leaves and its prospective effect on manganese-stressed *Helianthus annuus* (L.) seedlings. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 191, Article 110242. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110242
65. Mahmoudi, H., Marzouki, M., M'Rabet, Y., Mezni, M., Ouazzou, A. A., Hosni, K. (2020). Enzyme pretreatment improves the recovery of bioactive phytochemicals from sweet basil (*Ocimum basilicum* L.) leaves and their hydrodistilled residue by-products, and potentiates their biological activities. *Arabian Journal of Chemistry*, 13(8), 6451–6460. https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2020.06.003
66. European Parliament and Council (2013). Commission regulation (EU) No 723/2013 of 26 July 2013 amending Annex II to Regulation (EC) No 1333/2008 of the European Parliament and of the Council as regards the use of extracts of rosemary (E392) in certain low fat meat and fish products. Retrieved from https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2013/723 Accessed March 12, 2025
67. Dorman, H. J. D., Peltoketo, A., Hiltunen, R., Tikkanen, M. J. (2003). Characterisation of the antioxidant properties of de-odourised aqueous extracts from selected Lamiaceae herbs. *Food Chemistry*, 83(2), 255–262. https://doi.org/10.1016/s0308-8146(03)00088-8
68. Méndez-Tovar, I., Herrero, B., Pérez-Magariño, S., Pereira, J. A., Asensio-S.-Manzanera, Manzanera, M. C. (2015). By-product of *Lavandula latifolia* essential oil distillation as source of antioxidants. *Journal of Food and Drug Analysis*, 23(2), 225–233. https://doi.org/10.1016/j.jfda.2014.07.003
69. Mielnik, M. B., Sem, S., Egelandsdal, B., Skrede, G. (2008). By-products from herbs essential oil production as ingredient in marinade for turkey thighs. *LWT — Food Science and Technology*, 41(1), 93–100. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2007.01.014
70. Hoffman, D. L. (1987). The herb user's guide: The basic skills of medical herbalism. Thorsons Publishing Group. Wellingborough, UK, 1987.
71. el Hassouni, A., el Bachiri, A., Belbachir, C. (2019). *Lavandula dentata* solid residue from essential oil industry. *Journal of Essential Oil Bearing Plants*, 22(6), 1601–1613. https://doi.org/10.1080/0972060X.2019.1709906
72. Pandey, K. B., Rizvi, S. I. (2009). Plant polyphenols as dietary antioxidants in human health and disease. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*, 2(5), 270–278. https://doi.org/10.4161/oxim.2.5.9498
73. Wu, M., Brown, A. C. (2021). Applications of catechins in the treatment of bacterial infections. *Pathogens*, 10(5), Article 546. https://doi.org/10.3390/pathogens10050546


| AUTHOR INFORMATION | СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ |
|---|---|
| **Affiliation** | **Принадлежность к организации** |
| **Fatma Al-Zahraa Refat**, Researcher, Regional Center for Food and Feed, Agricultural Research Center<br>9, Gamaa Str., Giza, 12619, Egypt<br>E-mail: fatmarefat43@gmail.com<br>ORCID: https://orcid.org/0009-0000-9232-0324 | **Рефат Фарма Аль-З.** — Научный сотрудник, Региональный центр продовольствия и кормов, Центр сельскохозяйственных исследований<br>12619, Египет, Гиза, ул. Гамаа, 9<br>E-mail: fatmarefat43@gmail.com<br>ORCID: https://orcid.org/0009-0000-9232-0324 |
| **Afaf O. Ali**, Head Researcher, Regional Center for Food and Feed, Agricultural Research Center<br>9, Gamaa Str., Giza, 12619, Egypt<br>E-mail: afafomar428@gmail.com<br>ORCID: https://orcid.org/0009-0007-0496-7314 | **Али Афаф О.** — Главный научный сотрудник, Региональный центр продовольствия и кормов, Центр сельскохозяйственных исследований<br>12619, Египет, Гиза, ул. Гамаа, 9<br>E-mail: afafomar428@gmail.com<br>ORCID: https://orcid.org/0009-0007-0496-7314 |
| **Nashwa F. S. Morsy**, Ph.D., Professor, Food Science Department, Faculty of Agriculture, Cairo University<br>1, Gamaa Str., Giza, 12613, Egypt<br>E-mail: nanafsm@agr.cu.edu.eg<br>ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7648-2489<br>* corresponding author | **Морси Нашва С. М.** — Ph.D., профессор, Кафедра науки о пище, Сельскохозяйственный факультет, Каирский университет<br>12613, Египет, Гиза, ул. Гамаа, 1<br>E-mail: nanafsm@agr.cu.edu.eg<br>ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7648-2489<br>* автор для контактов |
| **Karima S. M. Hammad**, Associate Professor, Food Science Department, Faculty of Agriculture, Cairo University, Egypt<br>1, Gamaa Str., Giza, 12613, Egypt<br>E-mail: ka_sm_2008@agr.cu.edu.eg<br>ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4983-7920 | **Хаммад Карима С. М.** — Адъюнкт- профессор, Кафедра науки о пище, Сельскохозяйственный факультет, Каирский университет<br>12613, Египет, Гиза, ул. Гамаа, 1<br>E-mail: ka_sm_2008@agr.cu.edu.eg<br>ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4983-7920 |
| **Contribution** | **Критерии авторства** |
| Authors equally relevant to the writing of the manuscript, and equally responsible for plagiarism.<br>**Fatma Al-Zahraa Refat**: Writing — original draft, Methodology, Investigation, Formal analysis.<br>**Afaf O. Ali**: Writing — review and editing, Project administration, Data curation, Supervision.<br>**Nashwa F. S. Morsy**: Writing — review and editing, Writing — original draft, Validation, Project administration, Data curation, Supervision, Investigation, Conceptualization.<br>**Karima S. M. Hammad**: Writing — review and editing, Project administration, Data curation, Supervision. | Авторы в равных долях имеют отношение к написанию рукописи и одинаково несут ответственность за плагиат.<br>**Fatma Al-Zahraa Refat**: Написание текста — первоначальная версия, методология, исследование, формальный анализ.<br>**Afaf O. Ali**: Написание текста — рецензирование и редактирование, управление проектом, обработка данных, контроль<br>**Nashwa F. S. Morsy**: Написание текста — рецензирование и редактирование, написание текста — первоначальная версия, валидация, управление проектом, обработка данных, контроль, исследование, концептуализация.<br>**Karima S. M. Hammad**: Написание текста — рецензирование и редактирование, управление проектом, обработка данных, контроль. |
| **Conflict of interest** | **Конфликт интересов** |
| The authors declare no conflict of interest. | Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. |

DOI: https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-3-423-430

Поступила 14.03.2025
Поступила после рецензирования 22.09.2025
Принята в печать 26.09.2025
© Филатова А. В., Азимова Л. Б., Раджабов О. И., Тураев А. С., 2025

https://www.fsjour.com/jour
Научная статья
Open access

# ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛИСАХАРИДОВ *FOENICULUM VULGARE* ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В КАЧЕСТВЕ БИОЛОГИЧЕСКИ АКТИВНОЙ ДОБАВКИ К ПИЩЕ

Филатова А. В., Азимова Л. Б.*, Раджабов О. И., Тураев А. С.
Институт биоорганической химии, Ташкент, Узбекистан

*КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:*
*Foeniculum vulgare, полисахариды, ионообменная хроматография, гель-фильтрация, моносахаридный состав, ИК-спектроскопия*

АННОТАЦИЯ

Изучен минеральный состав фитомассы фенхеля обыкновенного (*Foeniculum vulgare*), произрастающего в горных районах Узбекистана. В данном виде сырья установлено высокое содержание биогенных элементов, в том числе кальция, калия, магния, фосфора, натрия и железа. Из *Foeniculum vulgare* выделены водорастворимые полисахариды. Содержание углеводов в очищенных образцах полисахаридов исследовано фенол-сернокислотным методом и составило 95,0–99,4 %. Анализ моносахаридного состава показал, что нейтральный полисахаридный состав представлен моносахаридами в следующем составе: глюкоза — 54,1 ± 2,5 %, галактоза — 21,5 ± 0,95 %, манноза — 12,9 ± 0,61 %. Состав кислого полисахарида представлен следующими моносахаридами: глюкоза — 42,6 ± 2,11 %, галактоза — 22,9 ± 1,13 %, манноза — 14,5 ± 0,68 %. Результаты ИК-спектроскопических исследований показали, что выделенные полисахариды состоят в основном из α-связанных пиранозных звеньев. Изучение острой токсичности полисахаридов показало, что они относятся к V классу практически нетоксичных соединений. $ЛД_{50}$ при пероральном введении мышам составила более 10000 мг/кг. Лечебное действие полисахаридов *Foeniculum vulgare* оказало положительное влияние на липидный фон кроликов с атеросклерозом, вызванным холестерином, а также гиперкоагуляционный эффект у кроликов с атеросклерозом как по внешнему пути свертывания крови, так и по внутреннему за счет ингибирования тромбина. Выявленная биологическая активность полисахаридов фенхеля обыкновенного позволит разработать на их основе биологически активную добавку.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Данная работа финансировалась за счет средств бюджета Института биоорганической химии имени академика А. С. Садыкова Академии наук Республики Узбекистан.

Received 14.03.2025
Accepted in revised 22.09.2025
Accepted for publication 26.09.2025
© Filatova A. V., Azimova L. B., Radjabov O. I., Turaev A. S., 2025

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

# STUDY OF POLYSACCHARIDES OF *FOENICULUM VULGARE* FOR USE AS A BIOLOGICALLY ACTIVE FOOD SUPPLEMENT

Albina V. Filatova, Luiza B. Azimova*, Otabek I. Radjabov, Abbaskhan S. Turaev
Institute of Bioorganic Chemistry, Tashkent, Uzbekistan

*KEY WORDS:*
*Foeniculum vulgare, polysaccharides, ion-exchange chromatography, gel filtration, monosaccharide composition, IR spectroscopy*

ABSTRACT

The mineral composition of the phytomass of common fennel (*Foeniculum vulgare*) growing in the mountainous regions of Uzbekistan has been studied. A high content of biogenic elements, including calcium, potassium, magnesium, phosphorus, sodium and iron has been established in this type of raw material. Water-soluble polysaccharides have been isolated from *Foeniculum vulgare*. The carbohydrate content in the purified polysaccharide samples was tested by the phenol-sulfuric acid method and amounted to 95.0–99.4 %. The analysis of the monosaccharide composition showed that the neutral polysaccharide composition is represented by monosaccharides in the following composition: glucose — 54.1 ± 2.5 %, galactose — 21.5 ± 0.95 %, mannose — 12.9 ± 0.61 %. The composition of the acidic polysaccharide is represented by the following monosaccharides: glucose — 42.6 ± 2.11 %, galactose — 22.9 ± 1.13 %, mannose — 14.5 ± 0.68 %. The results of IR spectroscopic studies showed that the isolated polysaccharides consist mainly of α-linked pyranose units. The study of acute toxicity of polysaccharides showed that they belong to class V of practically non-toxic compounds. $LD_{50}$ when administered orally to mice was more than 10000 mg/kg. The therapeutic action of *Foeniculum vulgare* polysaccharides had a positive effect on the lipid background of rabbits with atherosclerosis caused by cholesterol, as well as a hypercoagulation effect in rabbits with atherosclerosis both by the extrinsic pathway of blood coagulation and by the intrinsic one due to thrombin inhibition. The revealed biological activity of polysaccharides of *Foeniculum vulgare* will serve to develop a biologically active supplement based on them.

FUNDING: This work was funded by the budget of the acad. A. Sadikov Institute of Bioorganic Chemistry of Uzbekistan Academy of Sciences.

## 1. Введение

В последние десятилетия актуальность изучения растительного сырья и лекарственных препаратов на его основе возрастает с каждым днем. Преимущество растительных препаратов перед синтетическими заключается в том, что содержащиеся в них биологически активные вещества действуют на организм комплексно, имеют низкую токсичность и меньший риск возникновения побочных реакций [1,2]. Сельскохозяйственные и пищевые растения являются приоритетными в фитохимическом изучении, так как имеют достаточную сырьевую базу.

Фенхель обыкновенный (*Foeniculum vulgare*) небольшой род травянистых дву- и многолетних растений семейства Зонтичные (*Apiaceae*) с богатым опытом применения в медицине [3,4]. Является одним из лучших растительных источников калия, натрия, фосфора и кальция. В медицинских целях используют семена, корень и черешки травы, в которых содержится богатый комплекс витаминов и биологически активных веществ. Плоды данного растения достаточно хорошо изучены и являются источником эфирного масла [5]. Растение содержит до 6% эфирного масла, дубильные вещества,

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: **Филатова, А. В., Азимова, Л. Б., Раджабов, О. И., Тураев, А. С.** (2025). Исследование полисахаридов *Foeniculum vulgare* для применения в качестве биологически активной добавки к пище. *Пищевые системы*, 8(3), 423–430. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-3-423-430

FOR CITATION: **Filatova, A. V., Azimova, L. B., Radjabov, O. I., Turaev, A. S.** (2025). Study of polysaccharides of *Foeniculum vulgare* for use as a biologically active food supplement. *Food Systems*, 8(3), 423–430. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-3-423-430

полисахариды, аминокислоты, белки, флавоноиды [6]. Фенхель обыкновенный широко используется в пищевой промышленности как пряно-ароматическая добавка, обладает сладковато-пряным вкусом и запахом, сочетающим аромат укропа и аниса [7,8]. Плоды фенхеля используют в производстве кондитерских изделий, компотов, консервированных овощей и маринадов [9,10].

Семена и масло обладают множеством лечебных свойств, увеличивают секрецию и выделение мочи [11,12]. Экстракты и эфирное масло фенхеля находят применение в медицине для ликвидации кишечных газов, симптомов метеоризма, при лечении конъюнктивита [13,14]. Является прекрасным средством для лечения желудочно-кишечных заболеваний и колик, а также стимулирует здоровый аппетит и пищеварение. Семена фенхеля усиливают моторику желудочно-кишечного тракта и действуют как спазмолитик в высоких дозах [15]. Экстракты фенхеля снижают сокращение, вызванное ацетилхолином, и снижают максимально возможную сократимость [16]. Серия исследований показала, что фенхель эффективно контролирует многочисленные инфекционные заболевания бактериального, грибкового, вирусного, микобактериального и протозойного происхождения [17].

Это растение обладает полезными бактерицидными [18], антиоксидантными [19,20], противовоспалительными [21], обезболивающими [22], противомикробными [23], антибактериальными [24], антистрессовыми [25], антитромботическими [26], анксиолитическими [27], противоопухолевыми [28], гепатопротекторными [29], гипогликемическими [30] свойствами. Разнообразные фармакологические свойства и богатый химический состав фенхеля делают его перспективным сырьем для разработки новых лекарственных препаратов [31,32].

После извлечения плодов остается надземная часть — трава, которая, на наш взгляд, заслуживает детального изучения, так как содержит другие группы биологически активных веществ (БАВ) в различных количествах, отличные от состава плодов, и может выступать потенциальным дополнительным источником сырья. Прежде всего, к таким БАВ относят полисахариды. Полисахариды играют важную роль в росте и развитии живых организмов [33], которые привлекают большое внимание благодаря их биологическим функциям, таким как антиоксидантная [34], противоопухолевая [35], противомикробная [36] и иммуномодулирующая активность [37]. Растительные полисахариды не обладают токсичностью, аллергенностью и, в связи с этим перспективны для их возможного использования в практической медицине [38,39]. Дальнейшее изучение терапевтического потенциала фенхеля с помощью исследований *in vivo* и *in vitro* будет способствовать установлению механизмов фармакологического действия биологически активных веществ (БАВ) фенхеля. Эфирные масла, выделенные из фенхеля обыкновенного хорошо изучены, однако фитомасса растения систематически не изучена и не охарактеризована. В связи с этим целью исследования является выделение полисахаридов фитомассы *Foeniculum vulgare*, изучение их биологической активности для применения в качестве биологически активной добавки к пище.

## 2. Объекты и методы

*2.1. Объекты исследования*

Полисахариды, выделенные из фенхеля обыкновенного. Для эксперимента использовали надземную часть (трава, цветки, листья, стебли, плоды) дикорастущего *F. vulgare*, произрастающего в Бостанлыкском районе Ташкентской области Узбекистана. Сырье высушивали при комнатной температуре, измельчали до размера частиц не более 2 мм.

*2.2. Определение содержания макроэлементов*

0,250 г фитомассы *F. vulgare* взвешивали на аналитических весах и помещали в тефлоновую посуду. Затем добавляли концентрированную азотную кислоту и перекись водорода. После этого посуду помещали в автоклав и устанавливали в программируемый микроволновый разложитель Berghof SPEEDWAVE MWS-3+ (Berghof Products + Instruments GmbH, Германия). В зависимости от типа вещества выбирали соответствующую программу. После завершения разложения полученный раствор помещали в мерные колбы объемом 50 или 100 мл и доводили до нужного объема 0,5 % раствором азотной кислоты. Образцы проанализировали с использованием масс-спектрометра NEXION-2000 ICP-MS9 (Perkin Elmer, США). Реактивы, использованные в анализе: мультиэлементный стандарт на 29 элементов N3, стандарт с ртутью, азотной кислотой, перекисью водорода, дистиллированная вода и высокочистый аргон (99,995 %).

*2.3. Выделение полисахаридов*

Для выделения водорастворимых полисахаридов из фенхеля обыкновенного обезжиренное сырье высушивали до удаления запаха растворителей, взвешивали и экстрагировали трижды горячей водой на кипящей водяной бане (Cypress Diagnostics, Бельгия) с обратным холодильником (при суммарном соотношении сырья и экстрагента 1:4, 1:3, 1:2). Суммарная продолжительность трех экстрагирований составила 6 ч. Полученные водные экстракты объединяли и упаривали на роторном испарителе DLAB RE100-S, (DLAB Scientific, Китай) при температуре 50 °C до 1/5 первоначального объема, затем фильтровали. Из полученного концентрата водорастворимые полисахариды выделяли добавлением четырехкратного объема 96 % спирта этилового. После центрифугирования на ценрифуне CenLee20K (Hunan CenLee Scientific Instruments Co. Ltd, Китай) осадок отделяли, промывали спиртом этиловым на стеклянном фильтре, сушили при температуре 30 °C в сушильном шкафу FD56 (BINDER GmbH, Германия). Количественное содержание полисахаридов определяли гравиметрическим способом после высушивания осадка [40].

*2.4. Определение моносахаридного состава*

Для определения моносахаридного состава полисахарида проводили его полный кислотный гидролиз 2Н раствором $H_2SO_4$ при 100 °C в течение 20 ч. Для получения нейтральных моносахаридов гидролиз полисахарида осуществляли в запаянной ампуле во избежание возможного окисления. Гидролизаты нейтрализовали раствором $BaCl_2$ и упаривали до сиропообразного состояния. Получение ацетатов альдонитрилов сахаров проводили следующим способом: навеску, содержащую 3–5 мг свободных моносахаридов, помещали в пробирку с притертой пробкой, добавляли эквивалентное количество солянокислого гидроксиламина и 2 мл раствора внутреннего стандарта (25 мг инозита в 100 мл пиридина, перегнанного над гидратом окиси калия). Пробирку нагревали в течение 1 ч. Затем доливали 1 мл уксусного ангидрида и продолжали нагревание при 70 °C еще 1 ч. По окончании реакции аликвотную часть реакционной смеси вводили в колонку газового хроматографа. Анализ производных нейтральных (PF1) и кислых (PF2) полисахаридов осуществляли методом газовой хроматографии/масс-спектрометрии на газовом хроматографе Agilent 6890N с квадрупольным масс-спектрометром Agilent 5975 Inert. (США).

*2.5. Количественное определение нейтральных и кислых моносахаридов*

Общее содержание суммы нейтральных и кислых моносахаридов в гидролизате полисахаридов фитомассы *F. vulgare* определяли по цветной реакции спектральным способом в пересчете на галактозу [41].

*2.6. Ионообменная хроматография полисахаридов*

Фракцию полисахаридов 35–40 мг растворяли в 1,5 мл 0,01 М раствора NaCl и наносили на колонку 37×1,5 см с DEAE-целлюлозой (Fluka) в $Cl^-$-форме. Элюирование полисахаридов проводили последовательно 0,01, 0,2, 0,3 и 0,5 М раствором NaCl со скоростью 30 мл/ч. Отбирали фракции объемом по 10 мл. Выход полисахаридов из колонки контролировали фенол-сернокислотным методом. Фракции, соответствующие отдельным пикам, объединяли, концентрировали, диализовали и лиофильно высушивали.

*2.7. Гель-фильтрация полисахаридов*

Фракцию полисахаридов 35–40 мг растворяли в 1,5 мл 0,01 М раствора NaCl и наносили на колонку (41×1,6 см) с сефадексом G-75 (Fluka). Свободный объем колонки — 32 мл. Элюирование полисахаридов проводили 0,01 М раствором NaCl со скоростью 20 мл/ч. Отбирали фракции объемом 3 мл. Фракции, соответствующие отдельным пикам, объединяли, концентрировали и лиофильно высушивали.

*2.8. Количественное определение полисахаридов*

Для определения полисахаридов 0,25 $см^3$ гидролизата (фильтрата), предварительно разбавленного в 10 раз, помещали в пробирку, вносили 1 $см^3$ раствора свежеперегнанного фенола с концентрацией 0,6 моль·$л^{-1}$ и 5 $см^3$ концентрированной $H_2SO_4$ («хч»), горячий раствор выдерживали в течение 10 мин, а затем охлаждали в течение 10 мин при температуре 25 °C. Затем в 1 см кюветах записывали УФ-спектр, используя в качестве раствора сравнения те же реагенты и в тех же концентрациях, что и в рабочем растворе, за исключением того, что вместо гидролизата добавляли 0,25 $см^3$ дистиллированной воды. УФ-спектры записывали на спектрофотометре UV-1280 фирмы Shimadzu (Япония).

*2.9. ИК-спектроскопия*

ИК-спектры полисахаридов регистрировали на ИК-Фурье спектрометре системы 2000 (Perkin Elmer, США) в диапазоне частот 400–4000 $см^{-1}$ в таблетке с KBr.

*2.10. Изучение параметров острой токсичности*

Изучение параметров острой токсичности проводили по методу Литчфилда и Уилкоксона [42] на белых беспородных мышах-самцах массой тела 20 ± 1,5 г, по 6 животных в каждой группе, всего использовали 24 мышей. Все фармакологические исследования проводили на здоровых половозрелых животных (мышах), прошедших карантин не менее 10–14 дней, с соблюдением Международных правил работы с лабораторными животными. 20 % водный раствор исследуемого образца готовили путем растворения в дистиллированной воде. Полученный раствор вводили в виде 20 % водного раствора перорально однократно в дозах 4000, 5000, 6000, 8000, 10000 мг/кг. Мышам контрольной группы вводили дистиллированную воду в максимально физиологически допустимом объеме 0,5 мл. Дозы подбирались согласно модифицированной классификации Организации экономического содействия и развития (OECD, Test No420:2001). Наблюдение вели в течение 14 дней. Учитывали гибель мышей, общее поведение, окраску шерсти, состояние слизистых, дыхание, сердцебиение, двигательную активность, состояние волосяного и кожного покровов, положение хвоста, количество и консистенцию фекальных масс, частоту мочеиспускания, изменение массы тела и другие показатели. Всех подопытных животных содержали в одинаковых условиях и на общем рационе питания со свободным доступом к воде и пище в соответствии с этическими нормами Европейской конвенции о защите позвоночных животных, используемых для экспериментальных и иных научных целей1. В конце эксперимента вычисляли среднесмертельную дозу ($ЛД_{50}$) и определяли класс токсичности [43].

*2.11. Модель атеросклероза*

Модель атеросклероза проводили на 20 кроликах-самцах породы шиншилла с исходной массой тела 2,8–3,0 кг, которым длительно (3 мес.) вводили автоматической пипеткой холестерин кристаллический (STOCK-MED MCHJ, Китай) в дозе 200 мг/кг в хлопковом масле в объеме 4,0–4,5 мл. Спустя 1 месяц введения холестерина для усиления липидоза аорты в диету животных добавляли витамин D2 (эргокальциферол), раствор в масле 0,0625 % в дозе 0,256 мл/кг на протяжении 30 дней. С целью усиления склеротических изменений в аорте и снижения времени индукции атеросклероза, спустя 1 месяц от начала введения холестерина и на протяжении последующих 30 дней, каждые 5 дней животным вводили адреналин в дозе 0,04 мг/кг веса внутривенно (т. е. 6 инъекций).

В качестве препарата сравнения выбран экстракт чеснока жидкий (Kyolic, США).

Животные были поделены на группы: интактную, контрольную, опытную и препарат сравнения (экстракт чеснока). Полисахариды вводили перорально в дозе 10 мг/кг, экстракт чеснока в дозе 60 мг/кг на фоне холестериновой модели атеросклероза.

Было проведено исследование исходных показателей через 1, 2 и 3 месяца затравки и через 15 и 30 дней лечения, следующих параметров: общий белок; глюкоза; липидного спектра: триглицериды (ТГ), общий холестерин (ОХС), липиды высокой плотности (ЛПВП), липиды низкой плотности (ЛПНП), на биохимическом анализаторе BioChem FC-200 (High Technology Inc., США) с помощью наборов фирмы CYPESS DIAGNOSTICS (Германия). Содержание холестерина липопротеидов очень низкой плотности (ЛПОНП) и коэффициент атерогенности холестерина ($КА_{хс}$) рассчитывали по формуле Фридвальда:

$$КА_{хс} = ОХС - ЛПВП / ЛПВП, ЛПОНП = ТГ / 5. \quad (1)$$

Исследовали следующие показатели коагулограммы: протромбиновое время (ПВ); активированное частичное тромбопластиновое время (АЧТВ); время рекальцификации плазмы (ВРП); тромбиновое время (ТВ); фибриноген (ФБГ), на коагулометре (HUMACLOT Junior, Германия) с помощью наборов фирмы CYPRESS DIAGNOSTICS (Германия). Подсчет количества тромбоцитов в периферической крови производили под микроскопом Микромед 3, вар. 3–20 (Микромед, США) рутинным методом.

Для определения антитромботической активности свежие тромбы (50 мкл) заливали 0,5 мл физ. раствором и ставили в термостат при 37 °C. Через 1 час измеряли антитромботическую активность (АА, О.Е.) по развитию окраски, адсорбции супернатанта (сгусток + физ. раствор) на спектрофотометре UV-1280 (SHIMADZU, Япония) при максимальной длине волны поглощения при 410 нм и температуре 22–24 °C по формуле:

$$АА = \frac{\text{окраска супернатанта опыта}}{\text{окраска супернатанта контроля}}. \quad (2)$$

После инкубации повторно образовавшийся сгусток взвешивали. Плотность сгустка представлялась как масса оставшегося сгустка в мг. Скорость ингибирования или индицирования сгустка (СИС, %) рассчитывали следующим образом:

$$СИС = \frac{\text{масса сгустка контроля} - \text{масса сгустка опыта}}{\text{масса сгустка контроля}} \times 100. \quad (3)$$

Артериальное давление (систолическое (САД) и диастолическое (ДАД) артериальное давление) и частоту сердечных сокращений (ЧСС) измеряли с помощью автоматического цифрового тонометра LD8 (Little Doctor, Сингапур) для измерения артериального давления и частоты пульса на задней лапке кролика.

*2.12. Статистическая обработка данных*

Полученные данные были статистически обработаны путем определения критерия Стьюдента с использованием статистических программ Windows Excel 2010. Различие считали достоверным при $p \leqslant 0{,}05$.

## 3. Результаты

В данном исследовании был изучен минеральный состав фитомассы *F. vulgare*, произрастающего в горных районах Узбекистана. Были определены основные макроэлементы, микроэлементы и токсичные элементы в изучаемых образцах. В Таблице 1 представлено содержание основных макроэлементов в *F. vulgare*, которые имеют жизненно важное значение для человеческого организма и поддерживают различные физиологические процессы.

Таблица 1. **Содержание (С) основных макроэлементов в фитомассе фенхеля (*F. vulgare*)**

Table 1. **Content (C) of the main macroelements in phytomass of fennel (*F. vulgare*)**

| | **С, мг/кг** |
|---|---|
| P | 12220 |
| Ca | 34290 |
| Mg | 99780 |
| Na | 4375 |
| K | 5830 |
| Fe | 588 |
| Cu | 21,23 |
| Mn | 135 |
| Cr | 1,03 |
| Zn | 48,56 |
| Al | 247 |
| Pb | 0,22 |
| Ni | 4,25 |
| Mo | 0,10 |
| Se | 1,21 |
| Co | 0,69 |

Установлено высокое содержание биогенных элементов, включая кальций (Ca), калий (K), магний (Mg), фосфор (P), натрий (Na) и железо (Fe). Эти растения и их добавки могут быть эффективными в профилактике и лечении различных заболеваний, возникающих из-за нехватки макро-и микроэлементов в организме человека. Поэтому рекомендуется производство и практическое применение фитопрепаратов, настоев и пищевых добавок с экстрактом фенхеля. Полезное воздействие этого растения на здоровье создает возможность для обеспечения организма необходимыми элементами путем их включения в ежедневный рацион.

Далее из фитомассы *F. vulgare* методом водной экстракции были выделены водорастворимые полисахариды. При анализе образцов депротеинизированных полисахаридов методом Savage с использованием метода УФ-спектроскопии не наблюдались пиков, соответствующих белкам при 280 и 260 нм. Это означает, что данные образцы полисахаридов не содержат белки и пептиды. При пропускании образцов полисахаридов через DEAE-целлюлозу, их сначала промывали в дистиллированной воде и затем добавляли NaCl. Со временем концентрация раствора NaCl возрастала до 1,0 М. Нейтральные полисахариды были разделены при промывке дистиллированной

[1] WMA Declaration of Helsinki — ethical principles for medical research involving human subjects Retrieved from https://www.wma.net/policiespost/wma-declaration-of-helsinki-ethical-principles-for-medical-research-involving-human-subjects/ Accessed February 16, 2025

водой, что дало один пик (Рисунок 1). При промывке образцов NaCl, анионные полисахариды не разделялись. Это указывает на то, что данные образцы состояли из нейтральных полисахаридов.

Для определения гомогенности фракций исходных полисахаридов была проведена их очистка на сефадексе G-75 (Китай) от сопутствующих примесей с целью дальнейшего изучения состава и строения углеводных цепей. В процессе разделения было определено, что каждый образец полисахарида состоял из однородных полисахаридов (Рисунок 2).

Содержание углеводов в образцах очищенного полисахарида было проверено фенол-сернокислым методом и составило 95,0–99,4%.

Далее был изучен состав полисахаридов, результаты приведены в Таблице 2.

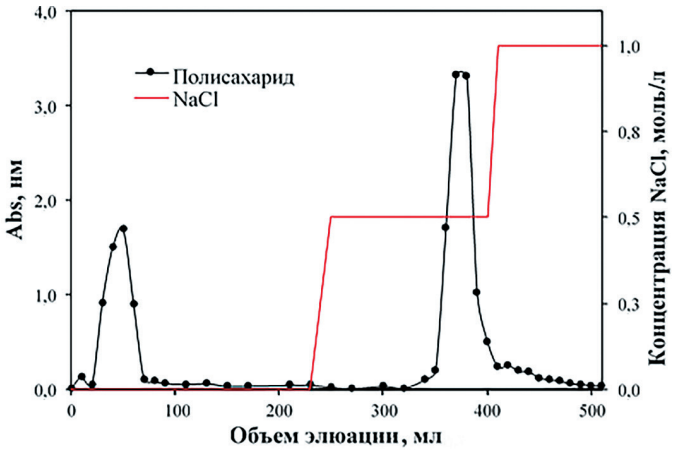



Рисунок 1. **Ионообменная хроматограмма полисахаридов в целлюлозной колонке DEAE-52 (элюент: 0–1,0 М градиент NaCl, скорость элюирования: 1 мл/мин)**

Figure 1. **Ion exchange chromatogram of polysaccharides in the cellulose column DEAE-52 (eluent: 0–1.0 M, NaCl gradient, elution rate: 1 ml/min)**

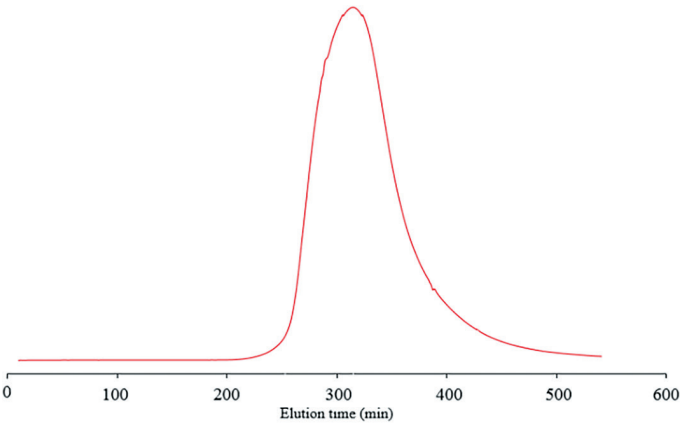



Рисунок 2. **Гель-хроматограмма фракции полисахаридов**

Figure 2. **Gel chromatogram of the polysaccharide fraction**

Таблица 2. **Содержание полисахаридов, суммы нейтральных и кислых моносахаридов в гидролизате полисахаридов, выделенных из *F. vulgare***

Table 2. **Content of polysaccharides, sum of neutral and acidic monosaccharides in the hydrolysate of polysaccharides isolated from *F. vulgare***

| Объект исследования | Содержание, % | | |
|---|---|---|---|
| | поли-сахариды | нейтральные моносахариды | кислые моносахариды |
| Экстракт фенхеля обыкновенного | 3,64±1,15 | 28,24±1,39 | 32,56±1,58 |

*Примечание*. Средние данные повторений достоверно не различаются ($p<0,05$).

Как видно из данных Таблицы 2, в экстракте фенхеля обыкновенного содержание полисахаридов составило 3,64%, из них нейтральных и кислых моносахаридов составило сответственно 28,24 и 32,56%.

Результаты изучения моносахаридного состава полисахаридов представлены в Таблице 3.

Из данных Таблицы 3 видно, что выделенные полисахариды из фитомассы *F. vulgare* состояли в основном из остатков глюкозы, галактозы, маннозы. В составе были обнаружены также другие моносахариды в малом количестве, в связи с чем их в основную структуру не включили. В следовых количествах в образцах находились рамноза, ксилоза.

Для подтверждения принадлежности полученных образцов к категории полисахаридов использовали ИК-спектроскопию. В ИК-спектрах образцов выделенных полисахаридов наблюдалось поглощение при 2937–3265 $см^{-1}$, характерное для валентных колебаний О-Н связи. В области 1140–1454 $см^{-1}$ наблюдалось поглощение, соответствующее полисахаридам и С-О связи карбоксильных групп. В области 640–830 $см^{-1}$ присутствовали полосы поглощения, характерные для различных типов колебаний С-Н связи. ИК-спектроскопические исследования показали, что образцы, выделенные из фитомассы *F. vulgare*, были представлены полисахаридами, так как в спектрах отмечены полосы поглощения в интервале 1016–1140 $см^{-1}$, соответствующие валентным колебаниям С-О-С связей глюкопиранозного кольца полисахаридов.

Была исследована острая токсичность выделенных полисахаридов. Общее действие и острую токсичность полисахаридов определяли на мышах при однократном пероральном введении. Каждая доза вещества исследовалась на 6 животных. Наблюдение вели в течение 14 дней. При пероральном введении мышам полисахаридов в дозах 4000, 5000, 6000 мг/кг не были выявлены изменения в поведении мышей, их физиологических показателях. При введении дозы 8000 мг/кг наблюдали кучкование и умывание мышей. Доза 10000 мг/кг вызывала через 20–25 минут умывание, кучкование, учащение дыхания, сужение глаз. Через 5–6 часов состояние животных пришло в норму. Гибели не было отмечено ни в одной из доз при введении образцов полисахаридов (Таблица 4).

Далее ежедневно в течение двух недель в условиях вивария у животных всех групп вели наблюдения за общим состоянием волосяного и кожного покрова, положением хвоста, количеством и консистенцией фекальных масс, частотой мочеиспускания, изменением массы тела и другими показателями. Установлено, что при введении полисахаридов животным во всех использованных дозах не наблюдали отклонения от нормы.

Таким образом, изучение острой токсичности полисахаридов показало, что они относились к V классу практически нетоксичных соединений. $LD_{50}$ при пероральном введении мышам составила более 10000 мг/кг.

Таблица 3. **Моносахаридный состав выделенных полисахаридов**

Table 3. **Monosaccharide composition of isolated polysaccharides**

| Полисахаридные фракции | Галактоза | Арабиноза | Глюкоза | Манноза | Фруктоза | Ксилоза | Рамноза |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| PF1 | 21,5±0,95 | 5,6±0,20 | 54,1±2,50 | 12,9±0,61 | 1,4±0,05 | 2,5±0,11 | 1,2±0,05 |
| PF2 | 22,9±1,13 | 7,4±0,25 | 42,6±2,11 | 14,5±0,68 | 1,9±0,08 | 3,2±0,12 | 1,8±0,09 |

*Примечание*. Средние данные повторений достоверно не различаются ($p<0,05$).

Таблица 4. **Результаты показателей острой токсичности при пероральном введении полисахаридов из фитомассы *F. vulgare***

Table 4. **Results of indicators of acute toxicity upon oral administration of polysaccharides from phytomass of *F. vulgare***

| Образцы | Вид животных/путь введения | Пол | Дозы, мг/кг | Число животных в группе/ число погибших животных | LD5 – M + m мг/кг |
|---|---|---|---|---|---|
| Полисахариды из фитомассы *Foeniculum vulgare* | Мыши/перорально | Самцы | 4000 | 6/0 | ⩾ 10000 |
| | | | 5000 | 6/0 | |
| | | | 6000 | 6/0 | |
| | | | 8000 | 6/0 | |
| | | | 10000 | 6/0 | |

Из литературных источников известно, что полисахариды растений влияют на сердечно-сосудистую систему [44]. Поэтому дальнейшие исследования направлены на изучение влияния выделенных полисахаридов на атеросклероз с целью получения на их основе биологически активной добавки к пище.

Основными показателями атеросклероза являются нарушение уровня общего холестерина, триглицеридов, липопротеинов низкой плотности, очень низкой плотности и высокой плотности. В Таблице 5 представлены биохимические показатели крови кроликов при введении атерогенных веществ и после лечения полисахаридами у кроликов с моделью атеросклероза. Контрольными данными являлись показатели 3 месяца от затравки.

Как видно из приведенных в Таблице 5 данных, через 2 и 3 месяца после введения полисахаридов и атерогенных веществ животным (затравка) содержание ОХС увеличилось соответственно в 8,4 и 11,2 раза ($p=0{,}001$); ТГ — соответственно в 4,0 и 5,1 раза ($p=0{,}001$), ЛПОНП — соответственно в 4,0, и 5,1 раза ($p\leq0{,}001$), ЛПНП — соответственно в 4,2 и 6,6 раза ($p\leq0{,}001$), ЛПВП увеличились в 1,1 и 1,39 раза ($p\leq0{,}001$), коэффициент атерогенности увеличился соответственно в 10,5 и 11,23 раза ($p\leq0{,}001$) по отношению к исходным данным. Содержание общего белка в течение 3-х месяцев затравки достоверно не отличалось от исходных показателей. Содержание глюкозы было увеличено в 1,29 и 1,38 раза ($p\leq0{,}001$) по отношению к исходным показателям.

Через 15 и 30 дней применения полисахаридов *F. vulgare* показатель ОХС сократился по отношению к 3 месяцу затравки в 2,7 и 4,2 раза ($p\leq0{,}001$), ТГ и ЛПОНП — соответственно в 3,6 раза ($p\leq0{,}001$), $КА_{хс}$ — соответственно в 2,7 и 4,1 раза ($p\leq0{,}001$) по отношению к контролю. Нормализовалось содержание глюкозы и ЛПВП, а ТГ, ЛПОНП и ЛПНП были выше исхода на 30–40 % ($p\leq0{,}001$), ОХС — в 2 раза ($p\leq0{,}001$), $КА_{хс}$ — в 2,7 раза ($p\leq0{,}001$).

Лечебное применение экстракта чеснока в течение 15 и 30 дней привело к уменьшению содержания ОХС соответственно в 2,8 и 3,3 раза ($p\leq0{,}001$) по отношению к контролю, ТГ и ЛПОНП — соответственно в 2,3 и 2,0 раза ($p\leq0{,}001$), $КА_{хс}$ — соответственно в 2,0 и 2,6 раза ($p\leq0{,}001$). Нормализовалось содержание глюкозы и ЛПВП, а ТГ, ЛПОНП и ЛПНП были выше исхода на 40–50 % ($p\leq0{,}001$), ОХС — в 5,0 раз ($p\leq0{,}001$), $КА_{хс}$ — в 6,4 раза ($p\leq0{,}001$).

Таким образом, терапевтическое действие полученных полисахаридов на 30 сутки оказывало положительное влияние на липидный фон кроликов с атеросклерозом, вызванным холестерином. Действие экстракта чеснока оказывала также положительное действие на липидный фон, но было на 20–50 % ниже полисахаридов.

Патогенез атеросклероза в себя включает повреждение эндотелиальных клеток. Это ведёт к агрегации тромбоцитов и снижению фибринолиза и представляет главный фактор риска развития тромботических осложнений атеросклероза. Сниженная эндогенная фибринолитическая активность может спровоцировать ускорение развития атеросклероза из-за периодических тромбообразований, вызванных инвазией митогенов, которые высвобождаются из сгустка в сторону луминальной поверхности сосудистой стенки [41].

Данные коагулограммы, приведенные в Таблице 6, показали, что ПВ через 2 месяца затравки атерогенными веществами достоверно не отличалось от исхода, через 3 месяца сократилось на 21 % ($p\leq0{,}01$), АЧТВ в эти же сроки — на 18 % ($p\leq0{,}01$) по отношению к исходу (12,2 ± 1,0 и 28,8 ± 2,6 сек).

ВРП в наибольшей степени отражает дефицит факторов, участвующих во внутреннем механизме образования протромбиназы, а также количество фибриногена, тромбоцитов и их функциональной активности. ВРП через 2 и 3 месяца затравки сократилось в 1,9 и 1,29 раза ($p\leq0{,}01$) по отношению к исходным данным (121 ± 3,6 сек).

ТВ характеризует течение последней фазы свертывания крови и зависит от содержания фибриногена и ингибиторов, блокирующих действие тромбина и превращение фибриногена в фибрин. ТВ через 2 и 3 месяца затравки сократилось в 2,5 и 1,27 раза ($p\leq0{,}01$).

Повышение концентрации фибриногена наблюдается при обширных воспалительных процессах, хронических пневмониях, инфарктах миокарда и др. По-видимому, это является защитной функцией организма, направленной на ограничения пораженного участка. Проведенные исследования показали, что содержание фибриногена через 2 и 3 месяца затравки увеличилось в 1,45 и 2,0 раза ($p\leq0{,}01$) по отношению к исходу (420 ± 31 мг/дл), что свидетельствует не только о гиперкоагуляции, но и о наличии обширного воспалительного

Таблица 5. **Биохимические показатели крови кроликов при введении атерогенных веществ и после лечения полисахаридами *F. vulgare* у кроликов с моделью атеросклероза (M ± m, n=4)**

Table 5. **Biochemical indictors of rabbit blood upon administration of atherogenic substances and after treatment with polysaccharides of *F. vulgare* in rabbits with the atherosclerosis model (M ± m, n=4)**

| Тесты | Исход | Сроки затравки, месяц | | Сроки лечения, дни | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | Полисахариды *Foeniculum vulgare* | | Экстракт чеснока | |
| | | 2 | 3 | 15 | 30 | 15 | 30 |
| Общий белок, г/л | 87,2 ± 4,20 | 91,00 ± 6,0 | 83,00 ± 6,2 | 86,00 ± 4,4 | 87,00 ± 4,6 | 86,00 ± 4,4 | 85,00 ± 4,4 |
| Глюкоза, ммоль/л | 4,20 ± 0,20[a] | 5,40 ± 0,2[a] | 5,80 ± 0,3[a] | 4,40 ± 0,3 [b] | 4,30 ± 0,3[b] | 4,40 ± 0,4[b] | 4,30 ± 0,3[b] |
| ОХС, ммоль/л | 2,20 ± 0,20 | 18,40 ± 1,5[a] | 24,60 ± 1,8[a] | 9,10 ± 0,6[a, b] | 5,80 ± 0,2[b] | 14,20 ± 1,0[a, b] | 10,80 ± 0,6[a, b] |
| ТГ, ммоль/л | 1,40 ± 0,10 | 5,60 ± 0,5[a] | 7,20 ± 0,6[a] | 2,30 ± 0,2[a, b] | 2,00 ± 0,2[a, b] | 2,60 ± 0, [a, b] | 2,10 ± 0,6[a, b] |
| ЛПОНП, ммоль/л | 0,28 ± 0,02 | 1,12 ± 0,1[a] | 1,44 ± 0,14[a] | 0,46 ± 0,03[a, b] | 0,40 ± 0,03[a, b] | 0,52 ± 0,05[a, b] | 0,42 ± 0,03[a, b] |
| ЛПНП, ммоль/л | 0,36 ± 0,03 | 1,50 ± 0,1[a] | 2,36 ± 0,12[a] | 0,66 ± 0,02[b] | 0,50 ± 0,02[b] | 0,68 ± 0,02[b] | 0,52 ± 0,02[b] |
| ЛПВП ммоль/л | 0,72 ± 0,06 | 0,80 ± 0,06[a] | 1,00 ± 0,10[a] | 0,88 ± 0,07[b] | 0,85 ± 0,07[b] | 0,77 ± 0,05[b] | 0,74 ± 0,06[b] |
| $КА_{хс}$ | 2,10 ± 0,18 | 22,00 ± 1,7[a] | 23,60 ± 1,8[a] | 9,30 ± 0,64[a, b] | 5,80 ± 0,64[a, b] | 17,40 ± 1,3[a, b] | 13,60 ± 0,64[a, b] |

*Примечание*. Средние данные повторений достоверно не различаются ([a]$p<0{,}001$ по отношению к исходу, [b]$p<0{,}001$ по отношению к контролю).

Таблица 6. **Коагулограмма и влияние на сердечно-сосудистую систему и вес кроликов при введении атерогенных веществ и после применения полисахаридов *F. vulgare* у кроликов с моделью атеросклероза, вызванного холестерином (M ± m, *n* = 4)**

Table 6. **Coagulogram and an effect on the cardiovascular system and rabbit weight upon administration of atherogenic substances and after the use of polysaccharides of *F. vulgare* in rabbits with the model of cholesterol-induced atherosclerosis (M ± m, *n* = 4)**

| Тесты | Исходные данные | Сроки затравки, месяцы | | Сроки лечения, дни | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | Полисахариды *F. vulgare* | | Экстракт чеснока | |
| | | 2 | 3 | 15 | 30 | 15 | 30 |
| ПВ, сек | 12,2 ± 1,0 | 10,1 ± 1,0 | 9,3 ± 0,7 | 13,8 ± 1,2 | 14,2 ± 1,2 | 12,8 ± 1,0[a] | 13,5 ± 1,3 |
| АЧТВ, сек | 28,8 ± 2,6 | 24,4 ± 2,3[a] | 24,4 ± 2,3[a] | 35,8 ± 2,8[a, b] | 42,5 ± 3,6[a, b] | 28,9 ± 3,0[b] | 34,4 ± 2,4[a, b] |
| ВРП, сек | 121 ± 3,6 | 65,1 ± 3,6 | 94,0 ± 7,4 | 137 ± 12,0 | 138 ± 12,2 | 128 ± 11,8 | 126,8 ± 10,2 |
| ТВ, сек | 25,4 ± 1,8 | 9,8 ± 1,0[a] | 20,0 ± 0,5[a] | 35,5 ± 2,8[a] | 41,2 ± 3,6 | 29,6 ± 2,7[a] | 26,4 ± 2,0 |
| ФБГ, мг/дл | 420 ± 31 | 610 ± 34[a] | 844 ± 36 | 410 ± 30 | 420 ± 31 | 522,4 ± 35,0 | 540,4 ± 35,0 |
| Тромбоциты, $10^9$/л | 344 ± 24,0 | 650 ± 43,0[a] | 777 ± 42 | 365 ± 25,0 | 348 ± 24,0 | 440,6 ± 32,0 | 377,6 ± 26,0 |
| ЧСС | 78,5 ± 5,3 | 112,0 ± 8,2[a] | 104,8 ± 9,1 | 68,4 ± 6,3 | 78,1 ± 6,3 | 67,0 ± 5,5 | 98,1 ± 6,7 |
| САД, мм. рт.ст. | 91,0 ± 7,4 | 110,0 ± 8,6[a] | 110,4 ± 8,6 | 73 ± 6,3 | 94,0 ± 7,6 | 62,6 ± 8,6 | 102,3 ± 9,6 |
| ДАД, мм. рт. ст. | 36,3 ± 2,5 | 39,6 ± 3,7[a] | 43,5 ± 3,6 | 33,0 ± 2,5 | 32,8 ± 2,7[a] | 33,8 ± 3,7 | 60,7 ± 4,7 |
| Вес животных, кг | 3,8 ± 0,22 | 3,6 ± 0,21 | 3,5 ± 0,20 | 3,7 ± 0,22 | 3,7 ± 0,21 | 3,8 ± 0,22 | 4,0 ± 0,24 |

*Примечание*. Средние данные повторений достоверно не различаются ([a]$p<0{,}01$ по отношению к исходу, [b]$p<0{,}01$ по отношению к контролю).

процесса. С этими данными коррелировалось увеличение количества тромбоцитов в периферической крови в 1,8 и 2,3 раза ($p \leq 0,01$) по отношению к исходу ($344,0 \pm 24,0 \times 10^9$/л). Увеличение количества тромбоцитов сопровождалось небольшим увеличением как САД и ДАД на 14–20 %, так и ЧСС на 43 и 32 % ($p \leq 0,01$) по отношению к исходу. Вес животных через 3 месяца затравки не только не увеличился, но незначительно снизился.

Лечебное применение полисахаридов через 15 дней и 30 дней привело к нормализации ПВ. В то же время АЧТВ через 15 дней было увеличено при применении полисахаридов на 47 и 24 % ($p \leq 0,01$) соответственно по отношению контролю и исходу, а при применении экстракта чеснока на 18 % по отношению к контролю. Через 30 дней введения этот эффект еще увеличился на 20 % в обоих опытных группах.

Еще большее гипокоагуляционное действие полисахаридов оказывало через 15 и 30 дней лечения на ТВ, увеличивая его на 78 и 106 % ($p \leq 0,01$). Действие экстракта чеснока было менее выражено — 48 и 32 % ($p \leq 0,01$) по отношению к контрольной группе животных.

Содержание фибриногена и тромбоцитов на 15 и 30 сутки лечения полисахаридов не отличались от исходных показателей, а при лечении экстрактом чеснока содержание фибриногена было увеличено по отношению к исходу на 24 и 29 % ($p \leq 0,01$), содержание тромбоцитов не отличалось от исхода. ЧСС, САД и ДАД приближались к норме. Вес животных приблизился к исходным показателям. Полисахариды *F. vulgare* оказывали гипокоагуляционное действие на процесс свертывания крови в основном по внутреннему пути на кроликов с атеросклерозом. Действие экстракта чеснока было менее выражено.

О тромботическом действии модели атеросклероза судили по определению деградации 50 мкл свернувшейся кроличьей крови. В Таблице 7 показан спектр поглощения супернатанта (сгусток крови + физиологический раствор) и вес сгустка. В группе животных, принимавших атерогенные вещества, через 2 и 3 месяца затравки окраска супернатанта сократилась в 1,48 и 1,42 раза ($p < 0,01$) по отношению к исходным данным (0,34 ± 0,02 О.Е.), антитромботическая активность составила 0,68 и 0,71 О. Е. Через 2 и 3 месяца затравки вес сгустка у кроликов достоверно увеличился в 1,66 и 1,58 раза ($p < 0,01$) и скорость индуцирования сгустка составила соответственно –67,0 и –51,0 %.

Применение полисахаридов и экстракта чеснока через 15 дней увеличила окраску супернатанта до исходных значений, а антитромботическая активность составила 1,25 и 1,21 О.Е. ($p \leq 0,01$) по отношению к контролю на 3 месяц затравки. Через 30 дней лечения окраска супернатанта возросла и антитромботическая активность составила 1,63 и 1,38 О.Е. ($p \leq 0,01$). Через 15 дней лечения полисахаридами и экстрактом чеснока вес сгустка у кроликов достоверно сократился по отношению к контрольным данным в 1,52 и 1,32 раза ($p < 0,01$), и скорость ингибирования сгустка составила соответственно +34,0 и +25,0 %. Через 30 дней лечения вес сгустка сократился по отношению к контрольным данным в 2,1 и 1,6 раза ($p < 0,01$) и скорость ингибирования сгустка составила соответственно +53,0 и +38,0 %. Таким образом, у кроликов с атеросклерозом, вызванным холестерином, в обоих группах после 30 дневного лечения, наблюдалось увеличение скорости ингибирования сгустка и увеличение антитромботической активности по отношению к группе животных с 3-х месячной затравкой. По эффективности полисахариды превосходили антитромботическое действие экстракта чеснока на 25–30 %.

## 4. Обсуждение

Данные, представленные в Таблице 5, показали, что полисахариды, выделенные из *F. vulgare*, обладали выраженной способностью корректировать тяжелую дислипидемию в экспериментальной модели атеросклероза у кроликов. 30-дневная терапия привела к снижению ключевых атерогенных маркеров: ОХС снизился на 76,4 % (с 24,6 до 5,8 ммоль/л), а КА — на 75,4 % (с 23,6 до 5,8) по сравнению с контрольной группой. Данный эффект не только статистически значим, но и превосходил действие многих других растительных полисахаридов, описанных в литературе, что подчеркивает высокий терапевтический потенциал исследуемого вещества.

Для более полного понимания полученных результатов был проведен сравнительный анализ с аналогичными исследованиями, использующими модель атеросклероза у кроликов. Например, полисахариды из *Ferula kuhistanica* в схожей модели снижали уровень холестерина в сыворотке на 46,7 % [45]. Полисахариды из *Polygonatum sibiricum* также показали значительное снижение ОХС и ЛПНП, однако количественные данные о процентном снижении в доступных публикациях не приводятся [46]. На фоне этих данных, 76,4 % снижение ОХС, достигнутое с помощью полисахаридов *F. vulgare*, выглядит исключительно высоким, что позволяет предположить их особую эффективность.

Механизмы, лежащие в основе такого выраженного гиполипидемического действия, вероятно, являются многофакторными. Во-первых, водорастворимые полисахариды могут ингибировать абсорбцию экзогенных липидов и холестерина в кишечнике. Они образуют вязкий гель, который связывает желчные кислоты, препятствуя их реабсорбции в энтерогепатической циркуляции. Это стимулирует печень к синтезу новых желчных кислот из холестерина, что приводит к снижению его уровня в крови. Наблюдаемое снижение ЛПНП и КАхс может быть связано с влиянием на транспорт липопротеинов, в частности, со снижением экспрессии аполипопротеина B (АпоB), основного белка ЛПНП [47]. Во-вторых, полисахариды могут модулировать активность ключевых ферментов липидного метаболизма в печени. Вероятно, они ингибируют 3-гидрокси-3-метилглутарил-кофермент А редуктазу (ГМГ-КоА-редуктазу), лимитирующий фермент в синтезе холестерина, и одновременно активируют холестерин-7α-гидроксилазу (CYP7A1), которая катализирует превращение холестерина в желчные кислоты [48].

Одним из наиболее значимых результатов данного исследования являлось проявление выраженной антикоагулянтной активности у полисахаридов *F. vulgare*. Анализ коагулограммы (Таблица 6) показал, что полисахариды фенхеля значительно удлиняли АЧТВ и ТВ, не оказывая существенного влияния на ПВ. Такая картина избирательного действия характерна для ингибиторов внутреннего (контакт-активируемого) и общего путей коагуляции [49]. Это отличает механизм действия полисахаридов от гепарина, который также влияет на эти пути, и от многих других растительных полисахаридов, которые часто проявляют схожий профиль активности. Важно подчеркнуть, что данный механизм принципиально отличается от ранее описанного антитромботического действия *F. vulgare*. Литературные данные указывают, что эфирные масла фенхеля и их основные компоненты (анетол, фенхон) ингибируют агрегацию тромбоцитов, то есть воздействуют на первичное звено гемостаза [50]. В настоящем исследовании показано, что полисахариды действовали на вторичный гемостаз — ферментативный каскад свертывания крови. Таким образом, предполагаемый механизм антикоагулянтного действия полисахаридов, вероятно, связан с их способностью потенцировать активность эндогенных ингибиторов коагуляции, таких как антитромбин III или гепариновый кофактор II. Усиливая их ингибирующее действие на тромбин (фактор IIa) и другие сериновые протеазы внутреннего пути (например, фактор Xa), полисахариды эффективно замедляли процесс образования фибринового сгустка.

Анализ полученных данных позволяет сделать вывод о наличии у полисахаридов *F. vulgare* уникального двойного терапевтического действия. Они одновременно воздействовали на фундаментальную причину атеросклероза — дислипидемию — и на тромбоз. Такой

Таблица 7. **Антитромботическая активность (АА) и скорость ингибирования сгустка при введении атерогенных веществ и полисахаридов у кроликов с моделью атеросклероза (M ± m, *n* = 4)**

Table 7. **Antithrombotic activity (AA) and rate of clot inhibition upon administration of atherogenic substances and polysaccharides in rabbits with the atherosclerosis model (M ± m, *n* = 4)**

| Тесты | Исходные данные | Сроки затравки, месяцы | | Сроки лечения, дни | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | Полисахариды *F. vulgare* | | Экстракт чеснока | |
| | | 2 | 3 | 15 | 30 | 15 | 30 |
| Супернатант 410 нм, О.Е. | 0,34 ± 0,02 | 0,23 ± 0,02[a] | 0,24 ± 0,02 | 0,30 ± 0,02[b] | 0,39 ± 0,03[b] | 0,29 ± 0,02[b] | 0,33 ± 0,03[b] |
| АА, О.Е. | | 0,67 | 0,70 | 1,25 | 1,63 | 1,21 | 1,38 |
| Вес сгустка, мг | 8,8 ± 1,0 | 14,8 ± 1,1[a] | 13,9 ± 1,1[a] | 9,2 ± 1,0[b] | 6,6 ± 1,0[b] | 10,5 ± 1,0[b] | 8,6 ± 0,4[b] |
| СИС, % | | –68 | –58 | +34 | +53 | +25 | +38 |

*Примечание*. Средние данные повторений достоверно не различаются ([a]$p < 0,01$ по отношению к исходу, [b]$p < 0,01$ по отношению к контролю).

двойной механизм является чрезвычайно ценным с клинической точки зрения. Большинство современных препаратов имеют узконаправленное действие: статины снижают уровень холестерина, а антикоагулянты и антиагреганты предотвращают тромбообразование. Наличие обоих свойств в одном природном соединении с низким профилем токсичности открывает широкие перспективы для создания на его основе комплексных средств для профилактики и лечения сердечно-сосудистых заболеваний.

## 5. Заключение

Изучен минеральный состав фитомассы фенхеля обыкновенного *(F. vulgare)*, произрастающего в горных районах Узбекистана. Установлено высокое содержание биогенных элементов, включая кальций (Ca), калий (K), магний (Mg), фосфор (P), натрий (Na) и железо (Fe) в данном виде сырья. Впервые выделены водорастворимые полисахариды из *F. vulgare*. Для получения очищенного полисахарида были использованы ионообменная хроматография и гель-фильтрация. Получены две полисахаридные фракции PF1 и PF2. Содержание углеводов в образцах очищенного полисахарида проверено фенол-сернокислым методом и составило 95,0–99,4 %. Анализ моносахаридного состава показал, что состав нейтрального (PF1) и кислого (PF2) полисахарида представлен моносахаридами в следующем составе, соответственно: глюкоза — 54,1 ± 2,5 и 42,6 ± 2,11 %, галактоза — 21,5 ± 0,95 и 22,9 ± 1,13 %, манноза — 12,9 ± 0,61 и 14,5 ± 0,68 %. Установлено, что полисахариды состоят в основном из остатков глюкозы, галактозы и маннозы. Другие моносахариды в их составе обнаруживаются в следовых количествах. ИК-спектроскопические исследования показали, что выделенные полисахариды из фенхеля обыкновенного состоят в основном из α-связанных остатков пиранозы. Изучение острой токсичности полисахаридов показало, что они относятся к V классу практически нетоксичных соединений. $LD_{50}$ при пероральном введении мышам составило более 10000 мг/кг. Лечебное действие полисахаридов *F. vulgare* оказало положительное влияние на липидный фон кроликов с атеросклерозом, вызванным холестерином, а также гиперкоагуляционный эффект у кроликов с атеросклерозом как по внешнему пути свертывания крови, так и по внутреннему за счет ингибирования тромбина. Выявленная биологическая активность полисахаридов фенхеля обыкновенного позволит разработать на их основе биологически активную добавку.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / REFERENCES


1. Elkordy, A. A., Haj-Ahmad, R. R., Awaad, A. S., Zaki, R. M. (2021). An overview on natural product drug formulations from conventional medicines to nanomedicines: Past, present and future. *Journal of Drug Delivery Science and Technology,* 63, Article 102459. https://doi.org/10.1016/j.jddst.2021.102459
2. Li, Y., Kong, D., Fu, Y., Sussman, M. R., Wu, H. (2020). The effect of developmental and environmental factors on secondary metabolites in medicinal plants. *Plant Physiology and Biochemistry*, 148, 80–89. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2020.01.006
3. Ningsih, R. S. R., Asra, R., Rivai, H. (2020). Overview of traditional use, phytochemical and pharmacological activities of fennel (*Foeniculum vulgare*). *International Journal of Modern Pharmaceutical Research*, 5(1), 01–09. https://doi.org/47760/ijpsm.2020.v05i12.001
4. Farid, A., Kamel, D., Montaser, S. A., Ahmed, M. M., El Amir, M., El Amir, A. (2020). Synergetic role of senna and fennel extracts as antioxidant, anti-inflammatory and anti-mutagenic agents in irradiated human blood lymphocyte cultures. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 13(1), 191–199. https://doi.org/10.1080/16878507.2020.1723948
5. Abd El-Kareem, M. S. M., Rabbih, M. A., Rashad, A. M., EL-Hefny, M. (2025). Essential oils from fennel plants as valuable chemical products: Gas chromatography-mass spectrometry, FTIR, quantum mechanical investigation, and antifungal activity. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 15, 9173–9191. https://doi.org/10.1007/s13399-024-05675-2
6. Castaldo, L., Izzo, L., De Pascale, S., Narváez, A., Rodriguez-Carrasco, Y., Ritieni, A. (2021). Chemical composition, in vitro bioaccessibility and antioxidant activity of polyphenolic compounds from nutraceutical fennel waste extract. *Molecules,* 26(7), Article 1968. https://doi.org/10.3390/molecules26071968
7. Noreen, S., Tufail, T., Badar Ul Ain, H., Awuchi, C. G. (2023). Pharmacological, nutraceutical, functional and therapeutic properties of fennel (*Foeniculum vulgare*). *International Journal of Food Properties*, 26(1), 915–927. https://doi.org/10.1080/10942912.2023.2192436
8. Mujovic, M., Šojić, B., Danilović, B., Kocić-Tanackov, S., Ikonić, P., Đurović, S. et al. (2023). Fennel (*Foeniculum vulgare*) essential oil and supercritical fluid extracts as novel antioxidants and antimicrobial agents in beef burger processing. *Food Bioscience*, 56, Article 103283. https://doi.org/10.1016/j.fbio.2023.103283
9. Awuchi, C. G. (2023). Medicinal and aromatic plants of the world — The medical, pharmaceutical, and nutritional biochemistry and uses of some common medicinal plants. Chapter in a book: Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS), Developed Under the Auspices of UNESCO, ELOSS Publishers, Paris, France, 2023.
10. Rajić, J. R., Đorđević, S. M., Tešević, V. V., Živković, M. B., Đorđević, N. O., Paunović, D. M. et al. (2018). The extract of fennel fruit as a potential natural additive in food industry. *Journal of Agricultural Sciences Belgrade*, 63(2), 205–215. https://doi.org/10.2298/JAS1802205R
11. Divya, D. (2022). Effect of Fennel seed: On women health. *International Journal of Advances in Nursing Management,* 10(2), 95–98. https://doi.org/10.52711/2454-2652.2022.00024
12. Barakat, H., Alkabeer, I. A., Althwab, S. A., Alfheeaid, H. A., Alhomaid, R. M., Almujaydil, M. S. et al. (2023). Nephroprotective effect of fennel (*Foeniculum vulgare*) seeds and their sprouts on $CCl_4$-induced nephrotoxicity and oxidative stress in rats. *Antioxidants*, 12(2), Article 325. https://doi.org/10.3390/antiox12020325
13. Ullah, A. M., Hassan, A., Hamza, A. (2025). Utilization of fennel (*Foenirulum vulgare*) as herb medicines. *International Journal of Clinical Reports and Studies*, 4(2), Article 114. https://doi.org/10.31579/2835-8295/114
14. Jourshari, M. Sh., Rezasoltani, P., Nazari, M., Maroufizadeh, S., Aski, S. K, Qobadighadikolaei, R. et al. (2024). A comparative study of fennel and dimethicone capsule effects on flatulence rate after cesarean section: A double-blind randomized controlled trial. *Journal of Education and Health Promotion*, 13, Article 251. https://doi.org/10.4103/jehp.jehp_389_23
15. Dheebisha, C., Vishwanath, Y. C. (2020). Advances in cultivation of fennel. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 9(2), 1295–1300.
16. Vasudevan, K., Vembar, S., Veeraragnavan, K., Haranath, P. S. (2000). Influence of intragastric perfusion of aqueous spice extracts on acid secretion in anesthetized albino rats. *Indian Journal of Gastroenterology: Official Journal of the Indian Society of Gastroenterology,* 19(2), 53–56.
17. Буракба, С., Марахова, А. И., Станишевский, Я. М., Василенко, И. А., Жилкина, В. Ю. (2024). Изучение потенциала фенхеля обыкновенного (*Foeniculum vulgare* Mill.) как ценного лекарственного растения. *Разработка и регистрация лекарственных средств*, 13(2), 59–67. [Bourakba, S., Marakhova, A. I., Stanishevskiy, Ya. M., Vasilenko, I. A., Zhilkina, V. Y. (2024). Exploring the potential of fennel (*Foeniculum vulgare* Mill.) as a valuable medicinal plant: A comprehensive (review). *Drug Development and Registration,* 13(2), 59–67. (In Russian)] https://doi.org/10.33380/2305-2066-2024-13-2-1617
18. Moradi, H., Farshadfar, M., Shirvani, H., Soltani, M., Gholipour, M. (2020). Investigation of the antibacterial effect of fennel and propolis extract on food microorganisms. *Honeybee Science Journal,* 11(20), 33–44. https://doi.org/1022092/hbsj.2020.342596.1087 (In Persian)
19. Mehra, N., Tamta, G., Nand, V. (2022). Phytochemical screening and in vitro antioxidant assays in *Foeniculum Vulgare* Mill. (fennel) seeds collected from Tarai region in the Uttarakhand. *Indian Journal of Natural Products and Resources*, 13(2), 213–222. https://doi.org/10.56042/ijnpr.v13i2.51347
20. Nwozo, O. S., Effiong, E. M., Aja, P. M., Awuchi, C. G. (2023). Antioxidant, phytochemical, and therapeutic properties of medicinal plants: A review. *International Journal of Food Properties*, 26(1), 359–388. https://doi.org/10.1080/10942912.2022.2157425
21. Mutlu-Ingok, A., Catalkaya, G., Capanoglu, E., Karbancioglu-Guler, F. (2021). Antioxidant and antimicrobial activities of fennel, ginger, oregano and thyme essential oils. *Food Frontiers*, 2(4), 508–518. https://doi.org/10.1002/fft2.77
22. Lee, H. W., Ang, L., Lee, M. S., Alimoradi, Z., Kim, E. (2020). Fennel for reducing pain in primary dysmenorrhea: A systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials. *Nutrients*, 12(11), 29–33, Article 3438. https://doi.org/10.3390/nu12113438
23. Умаров, У. А. (2024). Изучение эфирного масла корней фенхеля обыкновенного. *Universum: химия и биология*, 5–2(119), 29–33. [Umariv, U.A. (2024). Study of essential oil of fennel root. *Universum: Chemistry and Biology*, 5–2(119), 29–33.] https://doi.org/10.32743/UniChem.2024.119.5.17279
24. Kaveh, R., Naghmachi, M., Motaghi, M. M., Amirmahani, F., Danaei, M. (2022). Antibacterial and antioxidant activities and anticancer effects of fennel seeds (*Foeniculum vulgare*) against lung cancer cells. *Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section B: Biological Sciences*, 93(2), 311–316. https://doi.org/10.1007/s40011-022-01390-y
25. Alvarado-García, P. A. A., Soto-Vasquez, M. R., Rosales-Cerquin, L. E., Rodrigo-Villanueva, E. M., Jara-Aguilar, D. R., Tuesta-Collantes, L. (2020). Anxiolytic and antidepressant-like effects of *Foeniculum vulgare* essential oil. *Pharmacognosy Journal*, 14(2), 425–431. https://doi.org/10.5530/pj.2022.14.54
26. Anka, Z. M., Gimba, S., Nanda, A., Salisu, L. (2020). Phytochemistry and pharmacological activities of *Foeniculum vulgare*. *IOSR Journal Of Pharmacy*, 10(1), 1–10.
27. Зимбитцкая, Г. Е., Суботялов, М. А. (2023). Биологическая активность и терапевтический потенциал *Foeniculum vulgare*. *Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского Биология. Химия*, 9(3), 45–58. [Zimbittskaya, G. E., Subotyalov, M. A. (2023). Biological activity and therapeutic potential of *Foeniculum vulgare*. *Scientific Notes of V. I. Vernadsky Crimean Federal University. Biology. Chemistry,* 9(3), 45–58. (In Russian)]
28. Ke, W., Wang, H., Zhao, X., Lu, Z. (2021). *Foeniculum Vulgare* seed extract exerts anticancer effects on hepatocellular carcinoma. *Food and Function*, 12(4), 1482–1497. https://doi.org/10.1039/D0FO02243H
29. Samadi-Noshahr, Z., Hadjzadeh, M.A., Moradi-Marjaneh, R., Khajavi-Rad, A. (2021). The hepatoprotective effects of fennel seeds extract and trans-Anethole in streptozotocin-induced liver injury in rats. *Food Science and Nutrition*, 9(2), 1121–1131. https://doi.org/10.1002/fsn3.2090
30. Amirkhanloo, F., Esmaeilzadeh, S., Mirabi, P., Abedini, A., Amiri, M., Saghebi, R. et al. (2022). Comparison of *Foeniculum Vulgare* versus metformin on insulin resistance and anthropometric indices of women with polycystic ovary, an open-label controlled trial study. *Obesity Medicine,* 31, Article 100401. https://doi.org/10.1016/j.obmed.2022.100401

31. Tanveer, M., Shehzad, A., Butt, M. S., Shahid, M. (2021). Pharmacodynamics of foeniculum vulgare against ulcer, inflammation, hepatotoxicity and nephrotoxicity. *Journal of Animal and Plant Sciences (Pakistan)*, 31(3), 841–853.
32. Akram, M., Mohiuddin, E., Adetunji, C. O., Oladosun, T. O., Ozolua, P., Olisaka, F. N. et al. (2021). Prospects of phytochemicals for the treatment of helminthiasis. Chapter in a book: *Neglected Tropical Diseases and Phytochemicals in Drug Discovery*. John Wiley and Sons, Inc., 2021. https://doi.org/10.1002/9781119617143.ch7
33. Zhu, Q., Jiang, Y., Lin, S., Wen, L., Wu, D., Zhao, M. et al. (2013). Structural identification of (1→6)-α-D-Glucan, a key responsible for the health benefits of longan, and evaluation of anticancer activity. *Biomacromolecules*, 14(6), 1999–2003. https://doi.org/10.1021/bm400349y
34. Sukhikh, S. A., Dolganyuk, V. F., Kremleva, O. E., Ulrikh, E. V., Kashirskikh, E. V., Babich, O. O. (2023). Study of extraction parameters, quantitative yield of polysaccharides and the antioxidant activity of psychrophilic microalgae and cyanobacteria. *Food Systems*, 6(2), 202–210. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2023-6-2-202-210
35. Vikhareva, V. V., Leontieva, E. A., Begun, M. A., Chichinskas, E., Kalitnik, A. A., Khotimchenko, M. Yu. (2020). Antitumor activity of sulfated polysaccharides of Chondrus armatus alga of the Sea of Japan. *Siberian Medical Review*, 3, 78–85. https://doi. org/10.20333/2500136-2020-3-78-85
36. Гаврюшина, И. А., Громовых, Т. И., Фельдман, Н. Б., Луценко, С. В., Пономаренко, В. И., Кисиль, О. В. и др. (2020). Антимикробные свойства водорастворимых полисахаридов и спиртовых экстрактов мицелия Laetiporus sulphureus (bull.) Murrill и разработка биотехнологии его получения в иммобилизованной культуре на бактериальной целлюлозе. *Антибиотики и химиотерапия*, 65(1–2), 10–14. [Gavryushina, I. A., Gromovykh, T. I., Feldman, N. B., Lutsenko, S. V., Ponomarenko, V. I., Kisil, O. V. et al. (2020). Antimicrobial properties of water-soluble polysaccharides and alcoholic extracts of Laetiporus Sulphureus (bull.) Murrill mycelium and development of biotechnology for its production in immobilized culture on bacterial cellulose. *Antibiotics and Chemotherapy,* 65(1–2), 10–14. (In Russian)] https://doi.org/10.37489/0235-2990-2020-65-1-2-10-14
37. Eswar, K., Mukherjee, S., Ganesan, P., Rengan, A. K. (2023). Immunomodulatory natural polysaccharides: An overview of the mechanisms involved. *European Polymer Journal*, 188, Article 111935. https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2023.111935
38. Муйдинов, Н. Т., Раджабов, О. И., Гулямов, Т., Тураев, А. С., Атажонов, А. Ю., Баротов, К. Р. У. (2023). Разработка состава и исследование физико-химических и противоспаечных свойств биополимерных пленок на основе коллагена и Na-КМЦ. *Химия растительного сырья*, 4, 81–88. [Muydinov, N. T., Radjabov, O. I., Gulyamov, T., Turaev, A. S., Atajonov, A. Yu., Barotov, K. R. U. (2023). Composition and studying physico-chemical and antiadhesive properties of biopolymer films based on collagen and Na-CMC. *Chemistry of Plant Raw Material*, 4, 81–88 (In Russian)] https://doi.org/10.14258/jcprm.20230411940
39. Абдурахманов, Ж. А., Шомуротов, Ш. А., Ахмедов, О. Р., Хабибуллаев, Ж. А., Тураев, А. С., Хусенов, А. Ш. и др. (2025). Синтез новых производных крахмала, содержащих 2-аминоэтил серную кислоту. *Химия растительного сырья*, 1, 68–77. [Abdurakhmanov, J. A., Shomurotov, Sh. A., Akhmedov, O. R., Khabibullayev, Zh. A., Turaev, A. S., Khusenov, A. Sh. et al. (2025). Synthesis of new starch derivatives containing 2-aminoethyl hydrogen sulfate. *Chemistry of Plant Raw Material*, 1, 68–77. (In Russian)] https://doi.org/10.14258/jcprm.20250115174
40. Азимова, Л. Б., Филатова, А. В., Тураев, А. С., Джурабаев, Д. Т. (2021). Изучение полисахаридного комплекса, выделенного из *Aesculus hippocastanum l. Химия растительного сырья*, 3, 115–122. [Azimova, L. B., Filatova, A. V., Turaev, A. S., Djurabaev, D. T. (2021). Isolation and study of the polysaccharide complex isolated from *Aesculus hippocastanum L. Chemistry of Plant Raw Material*, 3, 115–122. (In Russian)] https://doi.org/10.14258/jcprm.2021039173
41. Filatova, A. V., Azimova, L. B., Makhmudov, L. U. (2023). Assessment of the pharmacological activity of *Aesculus hippocastanum* L. polysaccharides. *Pharmaceutical Chemistry Journal*, 57(7), 981–986. https://doi.org/10.1007/s11094-023-02974-2
42. Хабриев, Р. У. (2005). Руководство по экспериментальному (доклиническому) изучению новых фармакологических веществ. — М.: Издательство «Медицина», 2005. [Khabriev, R. U. (2005). Guidelines for the experimental (preclinical) study of new pharmacological substances. Moscow: Medicine, 2005. (In Russian)]
43. OECD (2002). Test No. 423: Acute Oral Toxicity-Acute Toxic Class Method. OECD Guideline for Testing of Chemicals Section 4. OECD, 2002. https://doi.org/10.1787/9789264071001-en
44. Dong, X., Zhou, M., Li, Ye., Li, Yu., Ji, H., Hu, Q. (2021). Cardiovascular protective effects of plant polysaccharides: A review. *Frontiers in Pharmacology*, 12, Article 783641. https://doi.org/10.3389/fphar.2021.783641
45. Saidkhojaeva, D. M., Rahmanberdyeva, R. K., Syrov, V. N., Shakhmurova G. A. (2024). Hypolipidemic and antiatherosclerotic activity of polysaccharides of *Ferula Kuhistanica*. *American Journal of Medicine and Medical Sciences*, 14(1), 144–146.
46. Yang, J.-x, Wu, S., Huang, X.-l., Hu, X.-q, Zhang, Y. (2015). Hypolipidemic activity and antiatherosclerotic effect of polysaccharide of Polygonatum sibiricum in rabbit model andrelated cellular mechanisms. *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine,* 2015(3), Article 391065. http://doi.org/10.1155/2015/391065
47. Jing, Y.-S., Ma, Y.-F., Pan, F.-B., Li, M.-S., Zheng, Y.-G., Wu, L.-F. et al. (2022). An insight into antihyperlipidemic effects of polysaccharides from natural resources. Molecules, 27(6), Article 1903. https://doi.org/10.3390/molecules27061903
48. Wu, Q., Wang, Q., Fu, J., Ren, R. (2019). Polysaccharides derived from natural sources regulate triglyceride and cholesterol metabolism: A review of the mechanisms. *Food and Function*, 10(5), 2330–2339. https://doi.org/10.1039/c8fo02375a
49. Wang, J., Lian, P., Yu, Q., Wei, J., Kang, W. (2017). Antithrombotic mechanism of polysaccharides in Blackberry (Rubus spp.) seeds. *Food and Nutrition Research*, 61(1), Article 1379862. https://doi.org/10.1080/16546628.2017.1379862
50. Alves-Silva, J.M., Zuzarte, M., Girão, H., Salgueiro, L. (2021). The role of essential oils and their main compounds in the management of cardiovascular disease risk factors. *Molecules*, 26, Article 3506. https://doi.org/10.3390/molecules26123506



| AUTHOR INFORMATION | СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ |
|---|---|
| **Affiliation** | **Принадлежность к организации** |
| **Филатова Альбина Васильевна** — ведущий научный сотрудник, доктор технических наук, Институт биоорганической химии Академии наук Республики Узбекистан<br>Узбекистан, 100125, Ташкент, ул. Мирзо Улугбека, 83<br>E-mail: albfil@mail.ru<br>ORCID: http://orcid.org/0000-0002-7911-1461 | **Albina V. Filatova**, Leading Researcher, Doctor of Technical Sciences, Institute of Bioorganic Chemistry Academic Sciences of the Republic of Uzbekistan<br>Mirzo Ulugbek str., 83, Tashkent, 100125, Uzbekistan<br>E-mail: albfil@mail.ru<br>ORCID: http://orcid.org/0000-0002-7911-1461 |
| **Азимова Луиза Бахтияровна** — младший научный сотрудник, Институт биоорганической химии Академии наук Республики Узбекистан<br>Узбекистан, 100125, Ташкент, ул. Мирзо Улугбека, 83<br>E-mail: luiza8181@mail.ru<br>ORCID: http://orcid.org/0000-0002-0673-5396<br>* автор для переписки | **Luiza B. Azimova**, Junior Researcher, Institute of Bioorganic Chemistry Academic Sciences of the Republic of Uzbekistan<br>Mirzo Ulugbek str., 83, Tashkent, 100125, Uzbekistan<br>E-mail: luiza8181@mail.ru<br>ORCID: http://orcid.org/0000-0002-0673-5396<br>* corresponding author |
| **Раджабов Отабек Искандарович** — старший научный сотрудник, кандидат химических наук, Институт биоорганической химии Академии наук Республики Узбекистан<br>Узбекистан, 100125, Ташкент, ул. Мирзо Улугбека, 83<br>E-mail: ximik_07@mail.ru<br>ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9196-7169 | **Otabek I. Radjabov**, Senior Researcher, Candidate of Chemical Sciences, Institute of Bioorganic Chemistry Academic Sciences of the Republic of Uzbekistan<br>Mirzo Ulugbek str., 83, Tashkent, 100125, Uzbekistan<br>E-mail: ximik_07@mail.ru<br>ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9196-7169 |
| **Тураев Аббасхан Сабирханович** — академик, доктор химических наук, директор, Институт биоорганической химии Академии наук Республики Узбекистан<br>Узбекистан, 100125, Ташкент, ул. Мирзо Улугбека, 83<br>E-mail: abbaskhan@mail.ru<br>ORCID: http://orcid.org/0000-0003-2915-9237 | **Abbaskhan S. Turaev**, Academician, Doctor of Chemical Sciences, Director, Institute of Bioorganic Chemistry Academic Sciences of the Republic of Uzbekistan<br>Mirzo Ulugbek str., 83, Tashkent, 100125, Uzbekistan<br>E-mail: abbaskhan@mail.ru<br>ORCID: http://orcid.org/0000-0003-2915-9237 |
| **Contribution** | **Критерии авторства** |
| 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. |
| **Conflict of interest** | **Конфликт интересов** |
| The authors declare no conflict of interest. | Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. |

DOI: https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-3-431-439

Received 22.03.2025
Accepted in revised 25.09.2025
Accepted for publication 29.09.2025
© Chaudhary A., Singh N., Nanda A., Pandey P., 2025
Available online at https://www.fsjour.com/jour
Original scientific article
Open access

# OPTIMIZATION OF WHEAT AND SORGHUM SEERA (SORGWHEAT SEERA): EFFECT ON FUNCTIONAL, PHYSICOCHEMICAL AND STRUCTURAL PROPERTIES

Ambika Chaudhary[1], Neetu Singh[1]*, Alka Nanda[1], Prashant Pandey[2,3]

[1]Department of Food and Nutrition, Food Science and Technology, School of Home Science, Babasaheb Bhimrao Ambedkar University, Lucknow, Uttar Pradesh, India
[2]Department of Pharmaceutical Sciences, Babasaheb Bhimrao Ambedkar University, Lucknow, Uttar Pradesh, India
[3]Faculty of Pharmacy and Pharmaceutical Sciences, University of Alberta, Edmonton, Alberta, Canada

*KEY WORDS:*
*wheat seera, sorghum seera, physicochemical property, functional property, structural property*

ABSTRACT

While many fermented products grace the market, seera stands out as a traditional delicacy from the hilly regions of Himachal Pradesh. The microflora found in seera includes yeasts such as *Saccharomyces cerevisiae* and *Cryptococcus laurentii*, as well as bacteria such as *Lactobacillus amylovorus* and *Bacillus* spp., which are crucial due to their distinct characteristics. Our research focuses on optimizing seera made from wheat and sorghum millet to enhance its quality. We used a mixture design approach to explore the effects of three independent variables: wheat (X1, 30–90 g), sorghum (X2, 30–90 g), and temperature (X3, 25–45 °C). The key performance indicators were bulk density (Y1), water absorption capacity (Y2), and oil absorption capacity (Y3). The optimal formulation, comprising 90 g of wheat, 30 g of sorghum, and a fermentation temperature of 25 °C, achieved impressive results: a bulk density of 538 kg/m$^3$, water absorption capacity of 1.605 g/g, and oil absorption capacity of 1.98 g/g. Compared to the control sample, sorgwheat seera exhibited higher protein and crude fiber content, while moisture levels were lower. Additionally, the morphology of the sorgwheat seera revealed fragmented particles, a testament to the fermentation process. This study highlights the potential of optimizing traditional fermented foods to improve their nutritional profile and functional properties.

ACKNOWLEDGMENT: The authors would like to express their gratitude and sincere appreciation to the Department of Food and Nutrition, Babasaheb Bhimrao Ambedkar University, Lucknow for providing their laboratory facility to conduct experiments and accomplish this study.

**Поступила 22.03.2025**
**Поступила после рецензирования 25.09.2025**
**Принята в печать 29.09.2025**
© Чаудхари А., Сингх Н., Нанда А., Пандей П., 2025
**https://www.fsjour.com/jour**
**Научная статья**
**Open access**

# ОПТИМИЗАЦИЯ СИРЫ ИЗ ПШЕНИЦЫ И СОРГО: ВЛИЯНИЕ НА ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ, ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ И СТРУКТУРНЫЕ СВОЙСТВА

Чаудхари А.[1], Сингх Н.[1]*, Нанда А.[1], Пандей П.[2,3]

[1]Кафедра пищевых продуктов и нутрициологии, Школа домоводства, Университет Бабасахеба Бхимрао Амбедкара, Лакхнау, Уттар-Прадеш, Индия
[2]Кафедра фармацевтических наук, Университет Бабасахеба Бхимрао Амбедкара, Лакхнау, Уттар-Прадеш, Индия
[3]Кафедра фармации и фармацевтических наук, Университет Альберты, Альберта, Эдмонтон, Канада

*КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:*
*сира из пшеницы, сира из сорго, физико-химические свойства, функциональные свойства, структурные свойства*

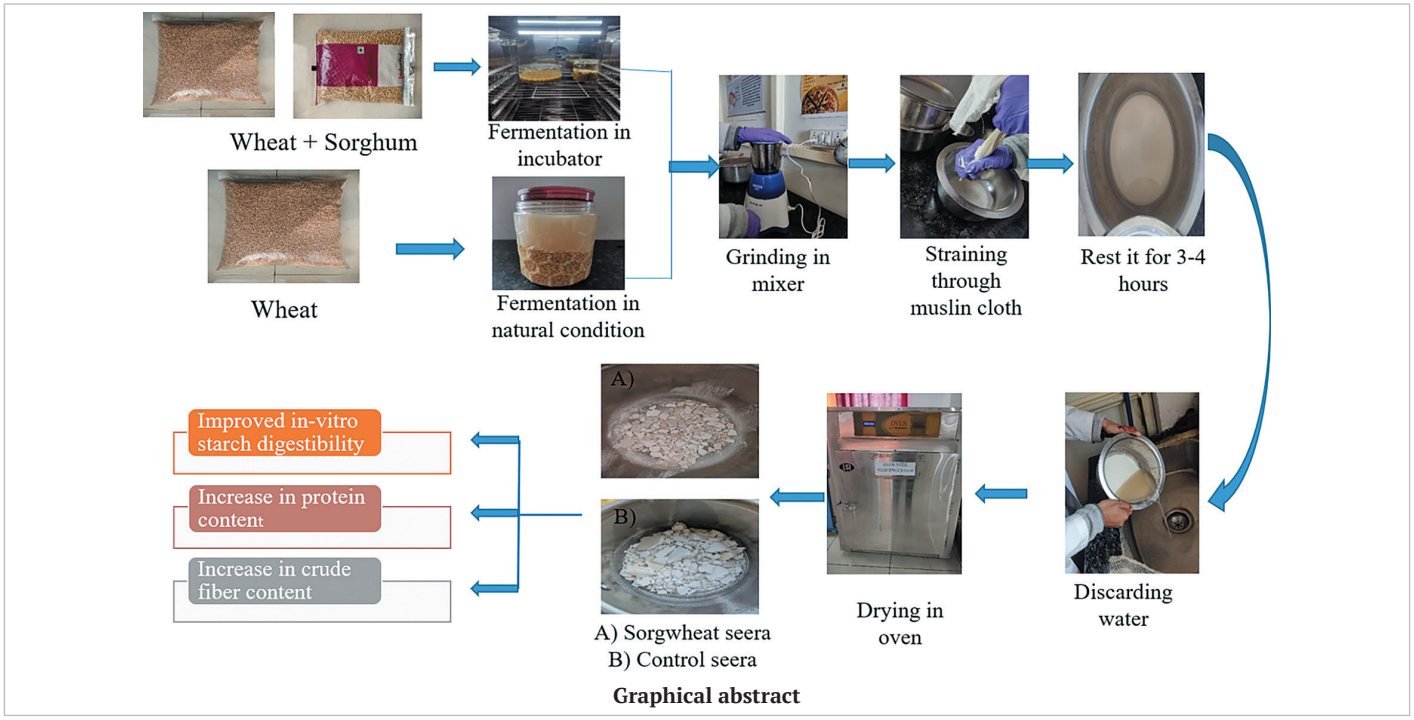
АННОТАЦИЯ

Хотя многие ферментированные продукты украшают рынок, сира выделяется как традиционный деликатес из высокогорных районов штата Химачал-Прадеш. Микрофлора, встречающаяся в сира, включает дрожжи, такие как *Saccharomyces cerevisiae* и *Cryptococcus laurentii*, а также бактерии, такие как *Lactobacillus amylovorus* и *Bacillus* spp., которые критически важные для её отличительных характеристик. Наше исследование сфокусировано на оптимизации сиры, изготовленной из пшеницы и сорго для повышения её качества. Мы использовали смешанную экспериментальную схему для изучения влияния трех независимых переменных: пшеница (X1, 30–90 г), сорго (X2, 30–90 г) и температура (X3, 25–45 °C). Ключевыми показателями эффективности были объемная плотность (Y1), водопоглощающая способность (Y2) и маслопоглощающая способность (Y3). Оптимальная рецептура, включающая 90 г пшеницы, 30 г сорго и температуру ферментации 25 °C, показала впечатляющие результаты: объемная плотность 538 кг/см$^3$, водопоглощающая способность 1,605 г/г и маслопоглощающая способность 1.98 г/г. По сравнению с контрольным образцом сира из сорго и пшеницы имела более высокое содержание белка и сырой клетчатки, в то время как уровни влаги были ниже. Кроме того, морфология сиры из сорго и пшеницы показала фрагментированные частицы — свидетельство процесса ферментации. Данное исследование подчеркивает потенциал оптимизации традиционных ферментированных пищевых продуктов для улучшения их пищевого профиля и функциональных свойств.

БЛАГОДАРНОСТИ: Авторы выражают благодарность и искреннюю признательность Кафедре пищевых продуктов и нутрициологии, университета Бабасахеба Бхимрао Амбедкара, Лакхнау, за предоставление лабораторного комплекса для проведения экспериментов и выполнения данного исследования.

FOR CITATION: **Chaudhary, A., Singh, N., Nanda, A., Pandey, P.** (2025). Optimization of Wheat and Sorghum Seera (Sorgwheat Seera): Effect on functional, physicochemical and structural properties. *Food Systems*, 8(3), 431–439. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-3-431-439

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: **Чаудхари, А., Сингх, Н., Нанда, А., Пандей, П.** (2025). Оптимизация сиры из пшеницы и сорго: влияние на функциональные, физико-химические и структурные свойства. *Пищевые системы*, 8(3), 431–439. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-3-431-439




**Graphical abstract**

## 1. Introduction

A typical fermented foodstuff found primarily in the rural and hilly regions of Himachal Pradesh is fermented wheat flour or seera. It is produced by fermenting wheat grains. Fermentation is a conventional, natural, and cost-effective bioprocessing technology that has been extensively utilized in the contemporary food business to enhance the nutritional and sensory attributes of food [1]. Fermented food provides a plethora of health advantages. In addition to its health benefits, seera also significantly contributes to enhancing flavor, nutritional content, and improving stability while reducing cooking time. In India, there are various types of fermented food made from cereals and legumes, such as bread, idli, dhokla, pinni, dosa, and papad. On the other hand, there is little information about a similar meal known as seera. Seera contains a diverse range of microflora that performs a crucial part in the process of fermentation. These include yeasts such as *Saccharomyces cerevisae*, *Cryptococcus laurentii*, and *Torulospora delbrukeckii*, as well as bacteria such as *Lactobacillus amylovorus*, *Bacillus* spp. and *Leuconostoc* spp.

Seera is often created through a spontaneous fermentation process that involves wheat grains being submerged, ground, and fermented. Water is poured over the grains for a period of 2–3 days to facilitate fermentation by the naturally occurring bacteria. After a period of 2–3 days, the grains are pulverized and the soaking process is finished to facilitate the settling of starch granules and certain nitrogenous substances, while the covering of the grain is eliminated. The solid material that settles is subsequently dehydrated by exposure to sunlight, resulting in a substance known as seera. In its fresh state, it appears to be bright and white. The way it looks is similar to semolina halva, but the texture is softer and smoother [2]. To make seera, the dried ingredients are put into water, which is then poured into hot ghee. The dried ingredients are combined with water and added to hot ghee to make seera. The right amount of sugar is then added to make a mush; it is then done [3].

Food epitomizes communal culture by conveying insights about dietary practices, preferences, consumption trends, nutritional security, community health, agricultural and animal systems, as well as socioeconomic, ethnic, and religious taboos [4]. Traditional knowledge is swiftly diminishing due to rapid urbanization, the homogenization of dietary practices, rural outmigration, deforestation, scarcity of plant resources, increased accessibility to allopathic medicine, and inadequate dissemination of information and expertise from older to younger individuals [5].

Traditional knowledge comprises information intertwined with local cultural values and ethics, facilitating the sustainable management of natural resources by indigenous populations and local organizations [6,7]. The Himalayan republics harbor thousands of varieties of fermented and ethnic dishes that are consumed. The predominant sustenance ingested by the populace in the country's remote regions comprises an array of ethnic cuisines from the Indian Himalayas, including Sepu Bari, Seera, Salori, Bhaturu, Aenkali, Childa-bhala, Gundruck, Dhulliachar, Jaanr, Angoori, Chuli, Auria, Jhol, Chhang, and Churpi. These foods have rarely been investigated for their potential to provide novel and health-enhancing microbes [8]. Foods such as seera are incredibly healthful. In sometimes, other grains like buckwheat, millet, and barley are added to make it even healthier. Some well-known traditional fermented foods that contain probiotics are seera, bhaturu, bari, jhol, chhang, and others. These foods are not only fermented in the traditional way, but they are also useful foods. This means that they are good for people's health in the state and across the country [9]. Fermented cuisine is becoming more and more popular worldwide. In Himachal Pradesh's remote marketplaces, it is distributed in tiny packets and provides a source of income for the local community. The inhabitants derive numerous health and economic advantages from it. In addition to its nutritious benefits, the local cuisine also showcases a dynamic diversity influenced by race and geography. It is advisable for individuals with jaundice and hepatitis. Postnatal women are also advised to use it. The data demonstrates that pregnant women in Himachal Pradesh engage in food preparation, including the making of seera, in order to prevent miscarriages [10,11].

Seera is mostly made from wheat grains, but the addition of millet boosts the nutritional content of seera. Fermented meals primarily consist of a complex amalgamation of proteins, carbohydrates, lipids, and other components, which are simultaneously or sequentially altered by various microbes.

An overall decline in antinutritional variables was noted, accompanied by an increase in nutrient bioavailability and bioaccessibility, antioxidant activities, and sensory attributes of cereal-based foods and beverages [12–14].

The ancient proverb "Let food be medicine" remains relevant today, especially considering the situation after the COVID-19 pandemic. The epidemic has compelled humanity, which reassess their dietary patterns, particularly due to the heightened desire for traditional and functional foods, which offer numerous health advantages. Nevertheless, many opportunities remain untapped as a result of insufficient technological capabilities for widespread manufacturing [15].

Although there are many studies on making seera, its functional properties, effect of different drying techniques on various properties of seera, optimization of multigrain seera with added values and multigrain fermented noodles using seera, there remains a significant gap in identifying the ideal fermentation temperature and wheat-to-sorghum ratio necessary for industrial scale processing. This research focuses on determining the optimal fermentation temperature and grain ratio, and evaluating their impact on the functional, physico-chemical and structural properties of sorgwheat seera. This study seeks the enhancement of nutritional value, digestibility and bioavailability of nutrients while optimizing the necessary parameters. The research also seeks to contribute to the revival of traditional food practices, improve nutritional intake and highlight their potential of health promotion and food diversification. Moreover, this study provides insights into process standardization, support of technological advancement for commercial-scale production, and ultimately, heritage and economic opportunities.

## 2. Objects and methods

### *2.1. Materials*

Wheat grains (*Triticum aestivum* L.) were purchased from Lulu hypermarket on Shaheed path road Lucknow. Sorghum grains (*Sorghum bicolor* L. Moench) were purchased from online big basket application.

### *2.2. Control and sorgwheat seera preparation*

The control seera was made using the technique described by [2]. In the traditional method, wheat grains were first soaked with water in the ratio of 1:2 at room temperature for 2–3 days to allow natural fermentation of grains. Following fermentation, grains were milled and steeped to enable the sedimentation of starch granules and some proteins, after which the bran was eliminated. Then the starch solids were sun dried, and the final product was called control seera. In sorgwheat seera, wheat and sorghum grains (according to the Central Composite Design formulations) were soaked with tap water at a ratio of 1:2 in an incubator for 48 hours. After soaking for 12 hours, the water was discarded (to avoid unintended fermentation) and fresh water was added right away. After fermentation, grains were ground in a mixture grinder, and wheat and sorghum bran were separated using muslin fabric. After extraction of starch, steeping was used to give the kernels of starch and some proteins sufficient time to set. Later on, water was decanted from the mixture. After that, settled solids were oven dried at 60 °C for 6–8 hours until a constant moisture was obtained.

### *2.3. Experimental design of sorgwheat seera*

Response Surface Methodology software was implemented to optimize the wheat and sorghum seera. In this study, the experiments were performed using a quadratic model in conjunction with the central composite design. The three independent variables were wheat (X1), sorghum (X2,) and temperature (X3). The dependent variables were bulk density (Y1), water absorption capacity (Y2) and oil absorption capacity (Y3). Seera was prepared by using 20 experimental formulations with three independent variables. Table 1 lists the CCD levels along with their coded values.

To find the ideal quantity of components, the results of responses from the quadratic model were analyzed. All responses were fitted using a polynomial equation of second order and this equation is:

$$Yi = B_{i1}X_1 + B_{i2}X_2 + B_{i3}X_3 + B_{i12}X_1X_2 + B_{i13}X_1X_3 + B_{i23}X_2X_3 + B_{i123}X_1X_2X_3 + \text{Error} \quad (1)$$

where, $Yi$ = attributes, $X_1$ = whole wheat, $X_2$ = whole sorghum, $X_3$ = temperature; $B_1$, $B_2$, $B_3$ = linear coefficients; $B_{12}$, $B_{13}$, $B_{23}$ = quadratic coefficients; $B_{123}$ = cubic coefficient.

Table 1. **Levels of independent variables for experimental design**

Таблица 1. **Уровни независимых переменных для схемы эксперимента**

| Symbol | Independent variables | Low level | Mid-level | High level |
|---|---|---|---|---|
| A | Whole wheat (g) | 10 | 60 | 110 |
| B | Whole sorghum (g) | 10 | 60 | 110 |
| C | Temperature (°C) | 18 | 35 | 52 |

#### *2.3.1. Bulk density*

Bulk density technique has been described by [2]. Ten milliliter graduated polycarbonate cylinders were carefully filled with the samples (control and optimized seera). The bottoms of the cylinders were slightly shaken several times on a lab table coated in foam until the sample level stopped dropping. The weight of the samples was computed. The weight of the samples divided by their volume (kg/m$^3$) was used to compute the bulk density. The weight of the samples divided by their volume after tapping (kg/m$^3$) was used to compute the tapped bulk density.

#### *2.3.2. Water absorption capacity*

Water absorption capacity technique has been described by [2]. In pre-weighed centrifuge tubes, 12.5 mL of distilled water was mixed with 1.5 g of each sample (seera), calculated on the basis of dry mass. After 30 minutes of ambient temperature stirring, dispersions were rotated for 15 minutes at 3000 rpm using a Sigma 3–18KS centrifuge (Sigma Laboezentrifugen, Germany). After draining the surplus moisture from the centrifuge tubes with the samples and decanting the supernatants, the tubes were weighed again. Grams (g) of water retained per grams (g) of seera were used to indicate the weight increase.

#### *2.3.3 Oil absorption capacity-*

This method of oil absorption capacity has been described by [2]. In centrifuge tubes that had been previously weighed, six milliliters of mustard oil and one gram of each sample (seera) were mixed. To distribute the sample throughout the oil, the contents were vortexed for one minute. After being stored vertically for 30 minutes, samples were rotated for 15 minutes at 3000 rpm (Sigma 3–18KS centrifuge, Sigma Laboezentrifugen, Germany). Pipettes were used to remove the oil coating, and the tubes were left upside-down for ten minutes to allow the oil to drain before being weighed again. The weight (wt.) increase was stated as grams of absorbed oil per grams of seera.

### *2.4. pH*

The method of pH was described by [16]. After standardizing at 25 °C using pH 4.0 and 7.0 buffers, samples were equally combined with purified water in a 1:1 ratio (w/v). The pH of the samples was then measured using a digital pH meter (MAC-1600 pH Meter, DKK-TOA Corporation, Japan).

### *2.5. Color*

A colorimeter (Chromameter, CR-400, Konica Minolta Optics, Japan) was used to assess the color of the seera samples using the L*, a*, and b* readings. The L* value, which has a range of 0 to 100, denotes brightness. The a* value indicates the level of the reddish-green color. A larger positive a* value shows more red. A degree of the yellow-blue color is represented by the b* value. Higher positive b* values indicate more yellow [2].

### *2.6. Proximate analysis*

Moisture, ash, fat, protein, crude fiber and carbohydrate content were determined as per the AOAC standards.

### *2.7. Texture analyzer*

The texture profile was determined by using a TA HD plus Texture Analyzer (Stable Micro Systems, United Kingdom) with a 5 kg load cell. A test using two-bit compression was employed. A 10-millimeter cube was prepared. The samples were crushed using a cylinder-shaped plunge (P/5, dia = 5 mm) at a rate of 0.5 mm/s up to a distance of 10.0 mm. A pair of biting force–time curves was generated, facilitating the measurement of all textural attributes [17].

### *2.8. Structural properties*

#### *2.8.1. Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)*

Using an FTIR spectrophotometer Nicolet 6700 (Thermo Scientific, USA), the Fourier transform infrared (FTIR) spectrum of flour was obtained at room temperature. After mixing the samples with potassium bromide powder, the mixture was compressed into tablets. Potassium bromide was used as a blank during calibration, and the collected spectrum fell between 600 and 4,000 cm$^{-1}$ [18,19].

#### *2.8.2. X-Ray Diffraction (XRD)*

Examination of the XRD patterns of the sorgwheat and control seera was done with an XRD (D8 Advance Eco, Bruker, Germany). The angle of scattering (2θ) was varied at a rate of 0.02° per angle between 5–60 °C. The operational current and voltage was adjusted to 35 mA — 40 kV during the test, respectively [20]. Using the amorphous area and crystalline area (AC) calculus, equation (2) was utilized to determine the crystallinity index (Ci) of the samples.

$$C_i = \frac{A_c}{A_c + A_a} \times 100. \quad (2)$$

#### *2.8.3. Scanning Electron Microscope (SEM)*

Morphological outer layer characteristics for the samples were analyzed using a scanning electron microscope (SEM) model (JSM 6490 LV, JEOL, Japan). Multiple magnifications were used to examine the sample, including ×550, ×1000, and ×2000. Before scanning, a small coating of platinum was applied to the control and sorgwheat seera samples to produce electricity. A distance of 7.4 mm was chosen as the working distance, and 15 kV was chosen as the acceleration voltage. The SEM apparatus was operated at a current of 58 μA [18].

### *2.9. Antimicrobial activity*

#### *2.9.1. Isolation of lactic acid bacteria*

Lactic acid bacteria (LAB) were isolated using the serial dilution agar method. An initial dilution of 1:10 was prepared by dissolving 1 g of each sample in 9 ml of sterile distilled $H_2O$ and vortexed thoroughly. The subsequent dilutions of $10^{-2}$, $10^{-3}$, $10^{-4}$, $10^{-5}$, and $10^{-6}$ were made in succession by transferring 1 ml from the previous tubes to the next tubes with 9 ml of water.

After seeding MRS agar plates and plates with nutrient agar with 0.1 ml of each dilution, they were left to incubate at 37 °C for 24 hours. Plate counts were determined on MRS agar for lactic acid bacteria and on nutrient agar for total aerobic mesophilic bacteria and presumptive *Bacillus* spp. (identified and enumerated based solely on macroscopic appearance in colonies); dedicated yeast isolation on selective yeast media (e. g., SDA/YPD with chloramphenicol) was not performed as part of the culture-dependent assays in this study. No obvious yeast colonies were

observed on the media used, and therefore yeasts are not reported among the predominant microflora.

*2.9.2. Strains*

The test strains of *Staphylococcus aureus* and *Escherichia coli* were taken from the culture collection of the Department of Microbiology, Babasaheb Bhimrao Ambedkar University, Lucknow, Uttar Pradesh (India).

*2.9.3. Preparation of the supernatant of bacterial isolates*

The strains were individually inoculated in sterile MRS broth at an initial bacterial concentration of $10^6$ CFU/ml. Following incubation at 37 ± 1 °C for 24 and 48 hours, the pH of each sample was determined in triplicate using a Jenway 3510 pH meter (Barloworld Scientific Ltd., Staffordshire, UK) before extraction. After specific incubation periods of 24 and 48 hours, the supernatants of each strain were obtained using centrifugation at 6000 rpm for 20 minutes at 4 °C and then sterilized using 0.22-µm pore size filters (MF-Millipore®, Merck KGaA, Darmstadt, Germany). All supernatants were preserved at –20 °C until utilized [21].

*2.9.4. Screening of selected isolates for antimicrobial activity*

Isolates were inoculated into MRS broth and allowed to incubate for 24 to 48 hours at 37 °C. Following incubation, the antibacterial activity was tested using the agar well diffusion technique as per Goa et al. [22]. *Escherichia coli* and *Staphylococcus aureus* were tested against the supernatant of bacterial isolates.

*2.9.5. Determination of inhibitory activity of LAB and Bacillus isolates*

The inhibitory potential of lactic acid bacteria (LAB) and *Bacillus* spp. was evaluated using the well diffusion assay. The test pathogen was grown in nutrient broth to the logarithmic phase and then spread uniformly on the surface of nutrient agar plates using a sterile cotton swab. Wells of 6 mm diameter were aseptically punched into the agar using a sterile cork borer. Cell-free culture supernatants of LAB and *Bacillus* isolates were prepared by centrifugation at 10,000 rpm for 10 min, followed by filtration through a 0.22 µm membrane filter to remove residual cells. Aliquots (100 µL) of these sterile supernatants were added into the wells, while sterile broth served as the negative control and the antibiotic as the positive control (vancomycin and ampicillin) for *Staphylococcus aureus* and *Escherichia coli*, respectively. Plates were incubated at 37 °C for 24 h, and antimicrobial activity was assessed by measuring the diameter of the clear inhibition zones around the wells.

*2.10. Statistical analysis*

For optimization and experimental design, central composite design of Design-Expert (version 13) was applied. The one-way ANOVA test was performed in the SPSS program, and Duncan's multiple range test was employed to ascertain significance of each term.

## 3. Result and discussion

The state of Himachal Pradesh has a vast basket of traditional foods of its own. People of the state have been following these methods of preparation from their ancestors and these dishes continue to be a tradition in most parts of Himachal. Some of the traditional foods still form a staple diet while the rest are prepared during special occasions. The food patterns of the state are highly influenced by the availability of raw materials as well as geographical and climatic conditions. The traditional fermented items prepared by the local people are generally associated either with festivals or with the seasons.

### *3.1. Optimization of seera*

RSM software was used to optimize an effect of the independent variables of seera on the responses such as bulk density, water absorption capacity and oil absorption capacity. The experimental results of all combinations of mixture design are presented in Table 2. In addition, ANOVA test was performed to assess the model suitability. All responses were statistically significant and are shown in Table 3. As a result, the second order regression equation appropriately described the effect of independent variables on the responses of the sorgwheat seera. A linear and interactive effect of each independent variable on responses was studied using the linear and 3D response surface plots shown in Figure 1.

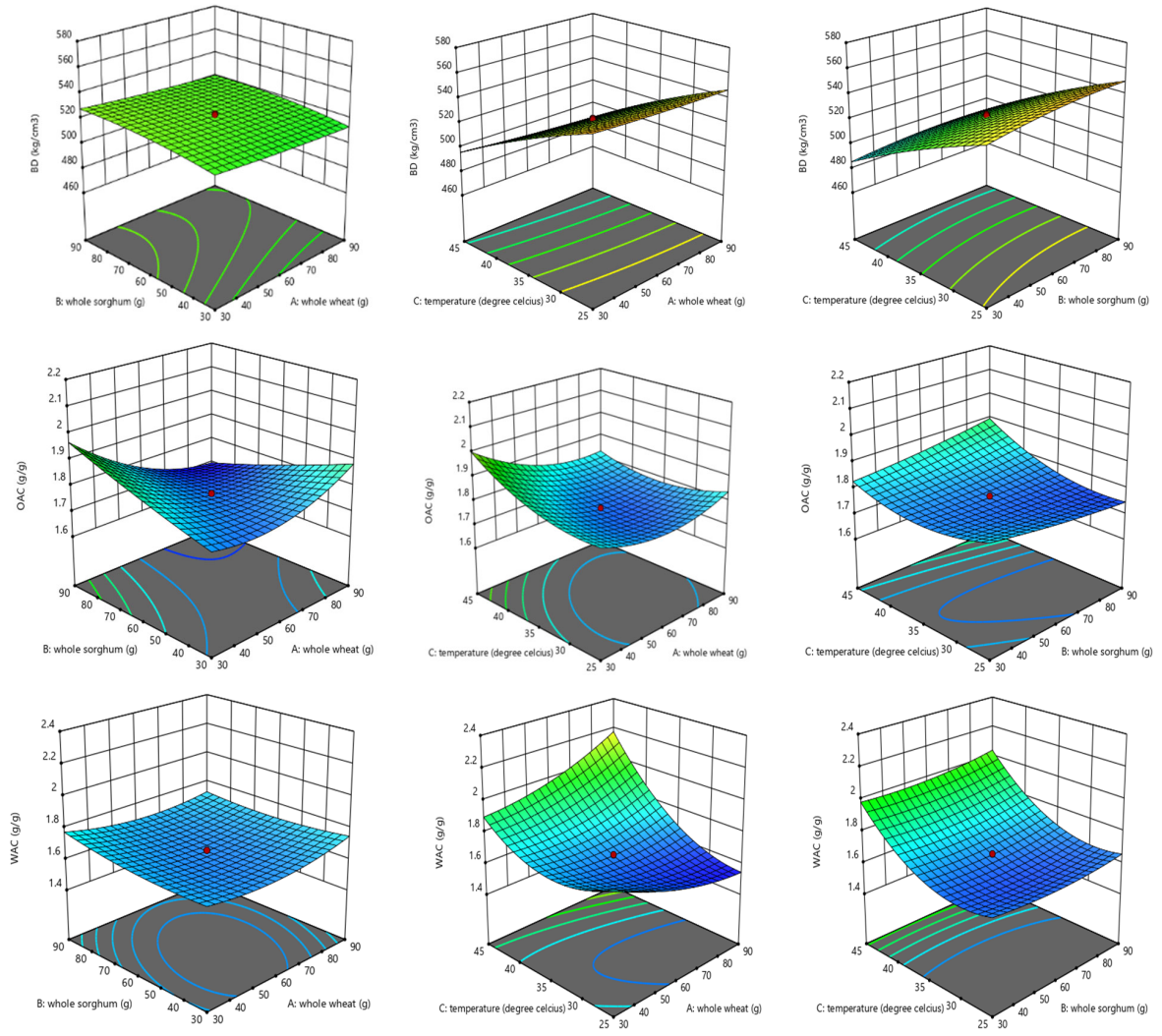



Figure 1. **Effect of variables on bulk density, water absorption capacity and oil absorption capacity**

Рисунок 1. **Влияние переменных на объемную плотность, водопоглощающую способность и маслопоглощающую способность**

Table 2. **Central Composite Design for variables: A (whole wheat), B (whole sorghum) and C (temperature) and their responses Y1 (bulk density (kg/m³), Y2 (water absorption capacity (g/g)) and Y3 (oil absorption capacity (g/g))**

Таблица 2. **Центральный композиционный план для переменных: A (цельная пшеница), B (цельное сорго) и C (температура) и их отклики Y1 (объемная плотность (kg/m³)), Y2 (водопоглощающая способность (г/г)) и Y3 (маслопоглощающая способность (г/г))**

| Run | Whole wheat, g | Whole sorghum, g | Temperature, °C | Y1, (kg/m³) | Y2, g/g | Y3, g/g |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **1** | 90 | 30 | 45 | 482 | 2.21 | 1.899 |
| **2** | 60 | 60 | 35 | 522 | 1.651 | 1.764 |
| **3** | 60 | 60 | 35 | 524 | 1.657 | 1.764 |
| **4** | 30 | 45 | 45 | 490 | 1.88 | 1.88 |
| **5** | 60 | 60 | 18 | 566 | 1.786 | 1.841 |
| **6** | 30 | 90 | 25 | 552 | 1.869 | 1.9 |
| **7** | 30 | 30 | 25 | 541 | 1.82 | 1.79 |
| **8** | 110 | 60 | 35 | 520 | 1.8 | 1.856 |
| **9** | 10 | 60 | 35 | 532 | 1.802 | 1.998 |
| **10** | 60 | 60 | 35 | 523 | 1.652 | 1.764 |
| **11** | 60 | 110 | 35 | 524 | 1.65 | 1.76 |
| **12** | 30 | 90 | 45 | 496 | 1.978 | 2.14 |
| **13** | 60 | 60 | 35 | 519 | 1.649 | 1.77 |
| **14** | **90** | **30** | **25** | **538** | **1.605** | **1.98** |
| **15** | 60 | 10 | 35 | 510 | 1.701 | 1.782 |
| **16** | 90 | 90 | 45 | 487 | 2.12 | 1.78 |
| **17** | 60 | 60 | 52 | 465 | 2.389 | 1.976 |
| **18** | 60 | 60 | 35 | 521 | 1.659 | 1.764 |
| **19** | 90 | 90 | 25 | 547 | 1.55 | 1.72 |
| **20** | 60 | 110 | 35 | 522 | 1.766 | 1.78 |

Table 3. **Results of regression coefficient and analysis of variance for an effect of a variable on bulk density, water absorption capacity and oil absorption capacity**

Таблица 3. **Результаты коэффициента регрессии и дисперсионного анализа для эффекта переменной на объемную плотность, водопоглощающую способность и маслопоглощающую способность**

| Source | BD | WAC | OAC |
|---|---|---|---|
| Model Intercept | 522.25 | 1.65 | 1.76 |
| A | −3.27 | 0.0019 | −0.0419 |
| B | 3.76 | 0.0150 | −0.0009 |
| C | −28.64 | 0.1785 | 0.0391 |
| AB | −0.3750 | −0.0251 | 0.0936 |
| AC | −1.13 | 0.1374 | −0.0439 |
| BC | −1.13 | 0.0132 | 0.0304 |
| A2 | 0.7964 | 0.0544 | 0.0602 |
| B2 | −2.73 | 0.0301 | 0.0076 |
| C2 | −2.77 | 0.1514 | 0.0514 |
| p-value | < 0.0001 | < 0.0001 | < 0.0001 |
| F-value | 275.88 | 2459.39 | 1022.12 |
| Lack of fit | 0.3693 | 0.0672 | 0.0877 |
| Std. dev. | 2.19 | 0.0066 | 0.0049 |
| Mean | 519.03 | 1.81 | 1.85 |
| $R^2$ | 0.9960 | 0.9995 | 0.9989 |
| Adj. $R^2$ | 0.9924 | 0.9991 | 0.9931 |

*3.1.1. Effect of independent variables on bulk density*

The bulk density of optimized seera ranged from 465 to 566 cm³, subjected to the level of independent variables. The maximum bulk density was observed for run 17 (60 g whole wheat, 60 g whole sorghum and a temperature of 52 °C and minimum for run 5 (60 g whole wheat, 60 g whole sorghum and 18 °C temperature). The quadratic model was established for bulk density. It was found that the independent variables (whole wheat, whole sorghum and temperature) had a significant impact on the multigrain seera flour ($P < 0.05$, $R^2$ 0.99).

The optimized bulk density of optimized seera in run 14 (90 g whole wheat, 30 g whole sorghum and a temperature of 25 °C) was found to be 538 cm³. The major impact on the bulk density is due to the temperature factor because at the lowest temperature there is less breakdown of starch particles during fermentation.

*3.1.2. Effect of independent variables on water absorption capacity*

The water absorption capacity of optimized seera ranged from 1.55 to 2.389 g/g, subjected to the level of independent variables. The maximum water absorption capacity was observed for run 17 (60 g whole wheat, 60 g whole sorghum and a temperature of 52 °C and minimum for run 19 (90 g whole wheat, 90 g whole sorghum and a temperature of 25 °C). The quadratic model was established for bulk density. It was found that the independent variables (whole wheat, whole sorghum and temperature) had a significant impact on the multigrain seera flour ($P < 0.05$, $R^2$ 0.99).

The optimized water absorption capacity of optimized seera in run 14 (90 g whole wheat, 30 g whole sorghum and a temperature of 25 °C) was found to be 1.605 g/g.

*3.1.3. Effect of independent variables on oil absorption capacity*

The oil absorption capacity of optimized seera ranged from 1.72 to 2.14 g/g, subjected to the level of independent variables. The maximum oil absorption capacity was observed for run 12 (30 g whole wheat, 90 g whole sorghum and a temperature of 45 °C) and minimum for run 19 (90 g whole wheat, 90 g whole sorghum and a temperature of 25 °C). The quadratic model was established for bulk density. It was found that the independent variables (whole wheat, whole sorghum, and temperature) had a significant impact on the multigrain seera flour ($P < 0.05$, $R^2$ 0.99).

The optimized oil absorption capacity of optimized seera in run 14 (90 g whole wheat, 30 g whole sorghum and a temperature of 25 °C) was found to be 1.98 g/g.

*3.1.4. Optimized values of independent variables*

Design-Expert Software (version 13) was used to determine the numerical optimization. The responses used were bulk density, water absorption capacity and oil absorption capacity. Numerical optimization recommended the maximum acceptability (0.877), which can be achieved by preparing of sorgwheat seera with whole wheat (90 g), whole sorghum (30 g) and temperature (25 °C), respectively. Bulk density, oil absorption capacity, and water absorption capacity were all optimum amounts of the projected values responses, respectively. Validation of the model was done by conducting experiments at an optimum level of independent variables: whole wheat (90 g), whole sorghum (30 g) and temperature (25 °C). The experimental data showed comparability with the control seera. The optimum levels of the concentration of whole wheat and whole sorghum, and temperature were 90 g, 30g, m and 25 °C, respectively.

### *3.2. Water and oil absorption capacity*

Water absorption capacity (WAC) in sorgwheat seera and control seera was found to be 1.688 (g/g) and 1.639 (g/g), respectively. The increase in WAC could be attributed to the low moisture content in the samples and formation of simple sugars, such as maltose, dextrin, glucose and so on, having higher affinity for water during fermentation [23,24].

Oil absorption capacity (OAC) of sorgwheat seera and control seera was found to be 1.941 (g/g) and 1.838 (g/g), respectively. As the native seera contains high amounts of starch and does not have polar groups, oil absorption merely depends upon the physical entrapment, size and shape of the starch [24,25,26]. The increase in OAC in sorgwheat seera can also be connected with the less deformed structure of starch and amino acids present in the final composition.

### *3.3. pH*

The pH of sorgwheat seera and control seera was 3.34 and 3.25, respectively. The pH of the samples decreased and showed the acidic nature. The low pH supports the growth of various yeasts and lactic acid bacteria important in food fermentation [27]. The pH value observed in earlier research by Savitri et al. [16] was 3.45, which corresponds closely to the present study.

### *3.4. Proximate analysis*

The proximate analysis of sorgwheat seera and control seera is represented in Table 4. Optimized sorgwheat seera depicted higher amount of protein (7.59 %), crude fiber (1.52) and fat (3.77) as compared to the control seera, which contained 6.27 % of protein, 1.04 % of crude fiber and 0.25 % of fat. The results are in agreement with the previous study by Ahmad et al. [17]. Mainly, the protein content, crude fiber and fat content were higher as compared to the control seera. Jeyakumar et al. [28] reported that fermentation improves protein digestibility by diminishing anti-nutritional agents and liberating free amino acids, without

necessarily elevating the total protein concentration. The increase in protein and crude fiber is due to the addition of sorghum in sorgwheat seera [29]. The moisture content in the sorgwheat and control seera was 8.99 and 11.10 %, respectively. The decrease in the moisture content of sorgwheat seera is due to the drying method used as compared to the control seera. Similar result was also shown by Ahmad et al. [2].

Table 4. **The proximate analysis of sorgwheat seera and control seera**

Таблица 4. **Приближённый анализ сиры из пшеницы и сорго и контрольной сиры**

| Parameters | Control | Sorgwheat seera |
|---|---|---|
| Carbohydrate, % | 78.46 ± 0.12[a] | 79.31 ± 0.20[b] |
| Fat, % | 0.25 ± 0.02[b] | 3.77 ± 0.20[a] |
| Protein, % | 6.27 ± 0.02[b] | 7.58 ± 0.02[a] |
| Ash, % | 0.41 ± 0.01[b] | 0.35 ± 0.01[a] |
| Moisture, % | 11.36 ± 0.01[a] | 8.96 ± 0.02[a] |
| Crude fiber, % | 1.04 ± 0.01[b] | 1.53 ± 0.02[a] |

Values expressed as mean ± S. D. Mean in rows with different superscript a, b, c is significant ($p < 0.05$).

### *3.5. Texture analyzer*

The hardness of the control seera and sorgwheat seera was found to be 450 g (4.41N) and 890 g (8.73 N), respectively. Gumminess is often measured for semi-solid meals; hence, we have chosen to evaluate this characteristic instead of chewiness, which is more applicable to solid foods. The gumminess value for the sorgwheat seera was determined to be 105.50 ± 3.1 gf. The springiness (elasticity) of sorgwheat seera was determined to be 0.275, which is much lower than that of the control seera. The reduction in springiness can be considered beneficial, as food with reduced springiness will necessitate less energy for chewing [30]. The adhesive property of the sorgwheat seera was also observed to be lower in comparison to the control seera [26].

### *3.6. Structural properties*

#### *3.6.1. Fourier-Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)*

FTIR of the control seera and sorgwheat seera is shown in Figure 2. A broad peak was observed at 3406 $cm^{-1}$ and 3400 $cm^{-1}$ for the control seera and sorgwheat seera, respectively. That might be O-H stretch vibrations. A small peak at 2905 $cm^{-1}$ and 2900 $cm^{-1}$ for both of the samples can be attributed to C-H bond stretching associated with the ring methane hydrogen atoms. The presence of carbohydrates can be confirmed from the fingerprint region of 1200–800 $cm^{-1}$. The protein region could be confirmed by the sharp peak at 1652 $cm^{-1}$ (amide 1), attributed to N-H amide bond stretching. This may be due to the addition of sorghum in the sorgwheat seera. In the control seera the peak was noticed at 1655 $cm^{-1}$. A small peak at 1302 $cm^{-1}$ and 1300 $cm^{-1}$ was ascribed to O-C-H, C–C-H and C-O-H bending vibrations. The peak at 1150 $cm^{-1}$ indicated the C-O and C-O-H vibrational modes [26,31,32]. The band at 997 $cm^{-1}$ represented the anhydrous C=O stretch of glucose ring and this region reflects the secondary structure of proteins [33]. The crucial band observed at 860 $cm^{-1}$ and minor peaks at 760 and 670 $cm^{-1}$ are known as the fingerprint region and ascribed to skeletal modes of pyranose ring of glucose units (starch).

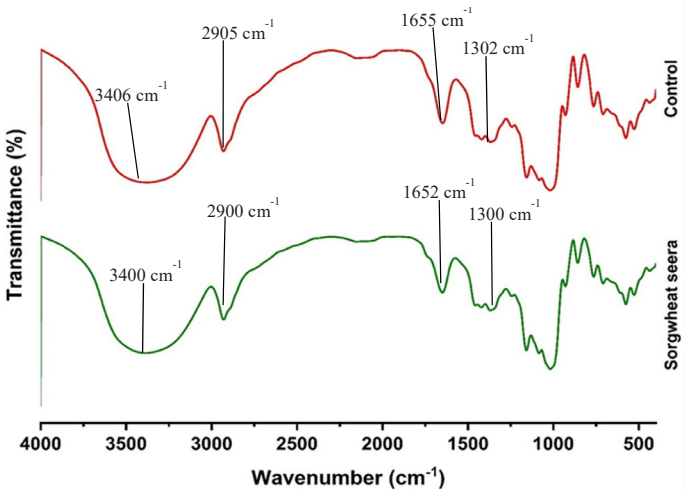



Figure 2. **Merged FTIR Spectra of the control and sorgwheat seera**

Рисунок 2. **Совмещенные спектры FTIR контрольной сиры и сиры из пшеницы и сорго**

#### *3.6.2. X-ray Diffraction (XRD)*

X-ray Diffraction (XRD) patterns of the control seera and sorgwheat seera are given in Figure 3. In both samples, the sharp peak identified at

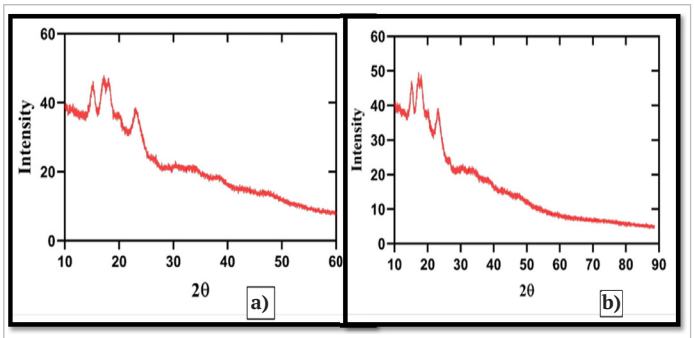



Figure 3. **X-ray diffraction of a) Control seera b) Sorgwheat seera**

Рисунок 3. **Рентгеновская дифракция: a) контрольная сира b) сира из пшеницы и сорго**

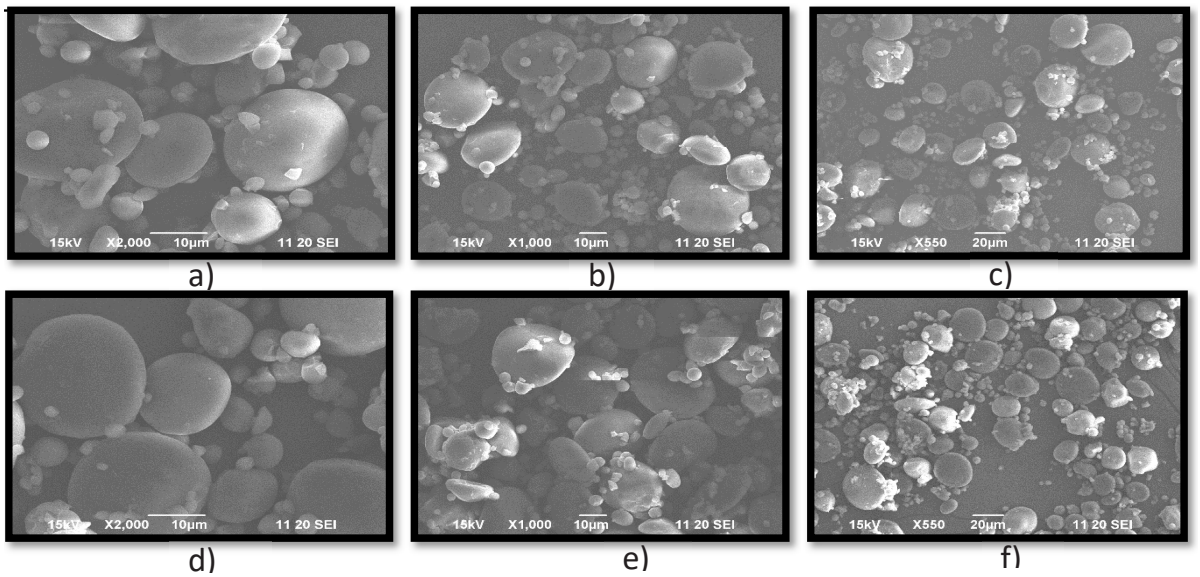



Figure 4. **Scanning Electron Microscopy of i) Control seera at a) X2000, b) X1000 c) X550 and ii) sorgwheat seera d) X2000, e) X1000 f) X550**

Рисунок 4. **Сканирующая электронная микроскопия i) контрольная сира при a) X2000, b) X1000 c) X550 и ii) сира из пшеницы и сорго Sorgwheat seera d) X2000, e) X1000 f) X550**

15° and 23° was observed. In addition, two more peaks were observed at 17° and 18°. The degree of crystallinity of the control seera and sorgwheat seera was found to be 33% and 25%, indicating that the amorphous region has improved. Furthermore, adding sorghum in the sorgwheat seera influences the crystallinity pattern of seera [31,34].

*3.6.3. Scanning Electron Microscopy (SEM)*

SEM analysis of the control seera and sorgwheat seera as is shown in Figure 4. SEM analysis reveals the structural orientation of macromolecules. The starch granules of seera were broken, and the fermentation phenomenon leads to superficial corrosion [17]. Zhao et al. [35] also reported small cracks and spots in fermented wheat starch. However, the crack size increased with an increase in the fermentation period. Starch granules of various sizes were visible on the sorgwheat seera and surface become rough and loosely attached to protein. It could be attributed to the breakdown of the starch protein network, which will eventually reduce hardness and accelerate water penetration. Fermentation improved the surface structure, which helped in food product development by improving its ability to rehydrate and absorb water [36].

### *3.7. Antimicrobial activity*

The microbial consortium in the developed seera was predominantly composed of lactic acid bacteria and presumptive *Bacillus* spp. The number of colonies that grew on the plates (Figure 5) was counted and reported as CFU $g^{-1}$ of the specimen. Total CFU count of all bacteria responsible to bring about characteristic fermentation in the samples ranged between $52 \times 10^6$ and $67 \times 10^6$ CFU/g as shown in Table 5.

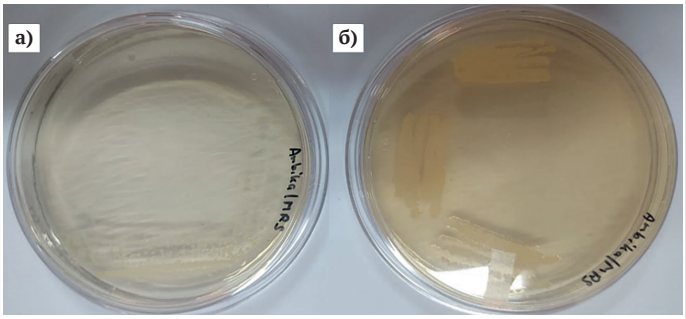



Figure 5. **Bacteria isolated from seera: a) *LAB* b) Presumptive *Bacillus* spp.**
Рисунок 5. **Бактерии, выделенные из сиры: а) МКБ b) Предполагаемые *Bacillus* spp.**

LAB/Presumptive *Bacillus* spp. was found to be predominant microflora in developed seera. Many LAB and presumptive *Bacillus* spp. were found to inhibit foodborne pathogenic bacteria, and the antagonistic potential of these microbes is of special interest to suppress the growth of many foodborne pathogens. The inhibitory action of these lactic acid bacteria and presumptive *Bacilli* spp. was explored.

Table 5. **Microbial profile of sorgwheat seera**
Таблица 5. **Микробиологический профиль сиры из пшеницы и сорго**

| Samples | Total Count (CFU/g) | Predominant microorganism |
|---|---|---|
| Control | $52 \times 10^{6a}$ | *Lactobacillus fermentum, Lactobacillus* spp. F1. |
| Sorgwheat seera | $67 \times 10^{6b}$ | *Lactobacillus fermentum, Lactobacillus* spp. F1. and presumptive *Bacillus* spp. |

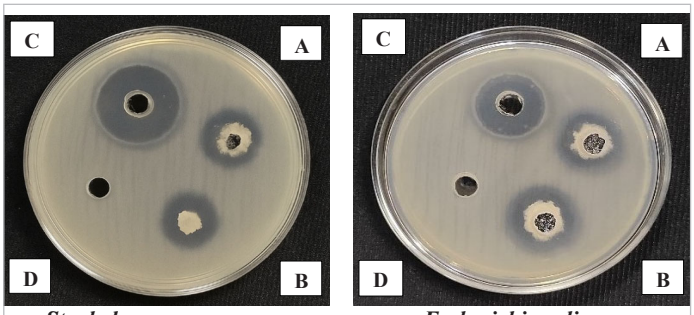
Data are means ± standard deviation of six replicates. All data were calculated on a dry weight basis.
a, b: Values in the same column with different superscripts are significantly different ($P < 0.05$) according to one-way ANOVA followed by Tukey's test.

*3.7.1 Inhibitory activity of LAB and Bacillus isolates*

The antibacterial efficacy of LAB and presumptive *Bacillus* isolates was confirmed by the well diffusion assay. The wells that contained the cell-free culture supernatants of the isolates showed distinct zones of inhibition, whereas the negative control wells showed no inhibition (Figure 6). In comparison to presumptive *Bacillus* species, LAB had relatively greater zones of inhibition among the tested isolates, suggesting stronger antagonistic activity. The results validate that both bacterial groups can generate extracellular inhibitory compounds that impede the growth of the test pathogen. The supernatant of presumptive *Bacillus* species inhibited *S. aureus* and *E. coli* with zones of 21 mm and 22 mm, respectively, as indicated in Table 6. In contrast, the supernatant of LAB species showed somewhat greater inhibition zones, especially against *E. coli* (24 mm) and *S. aureus* (21.5 mm). The positive control exhibited the largest inhibition zones (28 mm for *S. aureus* and 24.5 mm for *E. coli*), thereby confirming the experiment, while the negative control showed no inhibition. The results indicate that LAB isolates demonstrate more potent antagonistic effects than presumptive *Bacillus* spp., with both significantly enhancing the antibacterial potential of the produced seera.

Table 6. **Inhibition zones against *Staphylococcus aureus* and *Escherichia coli***
Таблица 6. **Зоны ингибирования *Staphylococcus aureus* и *Escherichia coli***

| Sample | Identity | Zone of inhibition (mm) | |
|---|---|---|---|
| | | *Staphylococcus aureus* | *Escherichia coli* |
| **A** | Presumptive *Bacillus* spp. supernatant | 21 | 22 |
| **B** | *LAB* spp. supernatant | 21.5 | 24 |
| **C** | Positive control | 28 | 24.5 |
| **D** | Negative control | — | — |




*Staphylococcus aureus* *Escherichia coli*

Figure 6. **Well diffusion assay showing inhibitory activity of LAB and *Bacillus* isolates against the test organisms**
Рисунок 6. **Анализ методом диффузии в агар, показывающий ингибирующую активность изолятов МКБ и *Bacillus* против тест-микроорганизмов**

## 4. Conclusion

Sorgwheat seera, which has various health benefits to tackle diseases, was optimized using the statistical tool RSM. The mixture design was used for the experiments. A total of 20 experiments were carried out. After these experiments were analyzed, the most desirable formulation was predicted by software, which was analyzed to characterize and compare sorgwheat seera with the control sample. The responses were bulk density, water absorption capacity and oil absorption capacity, which were found to be somewhat higher in sorgwheat seera than in the control sample. Sorgwheat seera had higher protein, crude fiber and fat content and was lower in moisture than the control sample. The lower pH of sorgwheat seera indicates the development of an acidic environment, which is characteristic of spontaneous cereal fermentations. Such an acidic condition is well-known to favor the growth and metabolic activity of lactic acid bacteria (LAB) and presumptive *Bacillus* species, both of which play a crucial role in cereal-based food fermentation.

In the present study, the isolation of *Lactobacillus* spp. and presumptive *Bacillus* spp. further validated the role of beneficial microflora, while antimicrobial assays confirmed their ability to produce extracellular inhibitory metabolites, thereby suppressing foodborne pathogens such as *Staphylococcus aureus* and *Escherichia coli*. Our findings reinforce the value of traditional, microbiome-driven processing in augmenting the nutritional benefits of cereal foods. While the Western World has the financial means to enhance its food with artificial vitamins, the poor world must depend on natural richness for its vitamins and critical amino acids. Seera is physiologically fortified with vitamins and amino acids through fermentation, making it a highly nutritious source of food for those who consume it. As seera is a traditional food product and is also limited to a particular region, this work may suggest a way forward to produce sorgwheat seera at commercial level with optimized parameters.

## REFERENCES


1. Ye, G., Guan, L., Zhang, M. (2024). Research progress on processing and nutritional properties of fermented cereals. *Journal of Food Science and Technology*, 62(2), 197–212. https://doi.org/10.1007/s13197-024-06099-6
2. Ahmad, S., Nema, P. K., Bashir, K. (2017). Effect of different drying techniques on physicochemical, thermal, and functional properties of seera. *Drying Technology*, 36(11), 1284–1291. https://doi.org/10.1080/07373937.2017.1399904
3. Thakur, N., T. C. Bhalla, T.C. (2004). Characterization of some traditional fermented foods and beverages of Himachal Pradesh. *Indian Journal of Traditional Knowledge,* 3(3), 325–335.
4. Sharma, R., Thakur, K., Kalia, M., Kalia, S., Suvedi, D. (2024). Traditional cereal-based cuisines from Himachal Pradesh Palampur region and their nutritional profile. *Journal of Applied Biology and Biotechnology*, 12(2), 83–90. https://doi.org/10.7324/jabb.2024.15547 1
5. Mohapatra, K. P., Mahajan, R., Langyan, S., Sarkar, S., Kumar, S., Semwal, D. P. et al. (2023). Indian horse chestnut [*Aesculus indica* (Wall. ex Cambress.) Hook. Hippocastanaceae]: A wild forest tree used for food and medicine by the tribes of Chamba, Himachal Pradesh, India. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 71(1), 539–547. https://doi.org/10.1007/s10722-023-01720-7
6. Negi, V. S., Pathak, R., Thakur, S., Joshi, R. K., Bhatt, I. D., Rawal, R. S. (2021). Scoping the need of mainstreaming Indigenous knowledge for sustainable use of bioresources in the Indian Himalayan region. *Environmental Management*, 72(1), 135–146. https://doi.org/10.1007/s00267-021-01510-w
7. Singh, R., Sharma, R. K., Babu, S., Bhatnagar, Y. V. (2020). Traditional ecological knowledge and contemporary changes in the agro-pastoral system of Upper Spiti landscape, Indian Trans-Himalayas. *Deleted Journal*, 10(1), Article 15. https://doi.org/10.1186/s13570-020-00169-y
8. Gautam, N., Sharma, N., Ahlawat, Y. K., Sharma, N. (2024). Formulation of health boosting foods by exploring the microbial wealth harbouring in ethnic food system of Indian Himalayas. *Flavour and Fragrance Journal*, 40(3), 402–416. https://doi.org/10.1002/ffj.3844
9. Panigrahi, S., Nanda, A., Sagar, P., Singh, N. (2024). Characterization and standardization of a millet-based probiotic beverage via physicochemical and microbial analysis. *Asian Journal of Food Research and Nutrition,* 3(2), 371–380.
10. Kanwar, P., Sharma, N. (2011). Traditional pre- and post natal dietary practices prevalent in Kangra district of Himachal Pradesh. *Indian Journal of Traditional Knowledge*, 10(2), 339–343.
11. Dwivedi, S., Singh, V., Mahra, K., Sharma, K., Baunthiyal, M., Shin, J.-H. (2024). Functional foods in the northwestern Himalayan Region of India and their significance: A healthy dietary tradition of Uttarakhand and Himachal Pradesh. *Journal of Ethnic Foods*, 11(1), Article 20. https://doi.org/10.1186/s42779-024-00236-4
12. Hasan, M. N., Sultan, M. Z., Mar-E-Um, M. (2014). Significance of fermented food in nutrition and food Science. *Journal of Scientific Research*, 6(2), 373–386. https://doi.org/10.3329/jsr.v6i2.16530
13. Adebo, J. A., Njobeh, P. B., Gbashi, S., Oyedeji, A.B., Ogundele, O.M., Oyeyinka, S.A. et al. (2022). Fermentation of cereals and legumes: Impact on nutritional constituents and nutrient bioavailability. *Fermentation*, 8, Article 63. https://doi.org/10.3390/fermentation8020063
14. Kitessa, D. A. (2024). Review on effect of fermentation on physicochemical properties, anti-nutritional factors and sensory properties of cereal-based fermented foods and beverages. *Annals of Microbiology*, 74(1), Article 32. https://doi.org/10.1186/s13213-024-01763-w
15. Rashwan, A.K., Yones, H.A., Karim, N., Taha, E.M., Chen, W. (2021). Potential processing technologies for developing sorghum-based food products: An update and comprehensive review. *Trends in Food Science and Technology*, 110, 168–182. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.01.087
16. Savitri, Thakur, N., Kumar, D., Bhalla, T.C. (2012). Microbiological and biochemical characterization of Seera: A traditional fermented food of Himachal Pradesh. *International Journal of Food and Fermentation Technology*, 2(1), 49–56.
17. Ahmad, S., Nasir, G., Azad, Z. R. A. A., Khan, Z. A., Jan, K., Bashir, K. (2023). Optimisation of multigrain seera from sorghum, green gram and finger millet: Effect of ingredients on functional, structural and thermal properties. *Journal of Food Science and Technology*, 61(3), 471–480. https://doi.org/10.1007/s13197-023-05854-5
18. Nanda, A., Singh, N. (2022). Preparation and antimicrobial activity of corn COB and COIR reinforced biodegradable starch biocomposite films for food packaging application. *Asian Food Science Journal*, 21(7), 53–66. https://doi.org/10.9734/afsj/2022/v21i730440
19. Pandey, P., Arya, D. K., Deepak, P., Ali, D., Alarifi, S., Srivastava, S. et al. (2024). αvβ3 integrin and folate-targeted pH-sensitive liposomes with dual ligand modification for metastatic breast cancer treatment. *Bioengineering*, 11(8), Article 800. https://doi.org/10.3390/bioengineering11080800
20. Gupta, P. C., Kapoor, A., Prashant Pandey. (2018). Designing and characterization of econazole nitrate nanostructured lipid carriers gel for topical delivery. *European Journal of Pharmaceutical and Medical Research*, 5(6), 559–567. https://doi.org/10.13140/RG.2.2.20751.07842
21. Huang, X., Nzekoue, F. K., Wang, J., Attili, A. R., Coman, M. M., Verdenelli, M. C. et al. (2025). A study of bioactivities and composition of a cocktail of supernatants derived from lactic acid bacteria for potential food applications. *Probiotics and Antimicrobial Proteins*. https://doi.org/10.1007/s12602-024-10442-w
22. Goa, T., Beyene, G., Mekonnen, M., Gorems, K. (2022). Isolation and characterization of lactic acid bacteria from fermented milk produced in Jimma Town, Southwest Ethiopia, and evaluation of their antimicrobial activity against selected pathogenic bacteria. *International Journal of Food Science*, 2022(1), Article 2076021. https://doi.org/10.1155/2022/2076021
23. Bashir, K., Aggarwal, M. (2016). Effects of gamma irradiation on the physicochemical, thermal and functional properties of chickpea flour. *LWT- Food Science and Technology*, 69, 614–622. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2016.02.022
24. Olamiti, G., Takalani, T. K., Beswa, D., Jideani, A. I. O. (2024). Effect of combined bioprocessing on antioxidant activity, chemical, functional, and microstructural properties of malted and fermented pearl millet (Pennisetum glaucum) and sorghum flour (Sorghum bicolour). *Cogent Food and Agriculture*, 10(1), Article 2390160. https://doi.org/10.1080/23311932.2024.2390160
25. Bashir, K., Aggarwal, M. (2017). Physicochemical, thermal and functional properties of gamma irradiated chickpea starch. *International Journal of Biological Macromolecules*, 97, 426–433. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.01.025
26. Bashir, K., Swer, T. L., Prakash, K. S., Aggarwal, M. (2016). Physico-chemical and functional properties of gamma irradiated whole wheat flour and starch. *LWT-Food Science and Technology,* 76(Part A), 131–139. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2016.10.050
27. Kitessa, D. A. (2024). Review on effect of fermentation on physicochemical properties, anti-nutritional factors and sensory properties of cereal-based fermented foods and beverages. *Annals of Microbiology*, 74(1), Article 32. https://doi.org/10.1186/s13213-024-01763-w
28. Jeyakumar, E., Lawrence, R. (2021). Microbial fermentation for reduction of antinutritional factors. Chapter in a book: Current Developments in Biotechnology and Bioengineering. Elsevier, 2021. https://doi.org/10.1016/b978-0-12-823506-5.00012-6
29. Sobowale, S. S., Bamidele, O. P., Adebo, J. A. (2024). Physicochemical, functional, and antinutritional properties of fermented Bambara groundnut and sorghum flours at different times. *Food Chemistry Advances*, 4, Article 100729. https://doi.org/10.1016/j.focha.2024.100729
30. Terrazas-Avila, P., Palma, H., Navarro-Cortez, R. O., Hernández-Uribe, J. P., Piloni-Martini, J., Vargas-Torres, A. (2024). The effects of fermentation time on sourdough bread: An analysis of texture profile, starch digestion rate, and protein hydrolysis rate. *Journal of Texture Studies*, 55(2), Article e12831. https://doi.org/10.1111/jtxs.12831
31. Kizil, R., Irudayaraj, J., Seetharaman, K. (2002). Characterization of irradiated starches by using FT-Raman and FTIR spectroscopy. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 50(14), 3912–3918. https://doi.org/10.1021/jf011652p
32. Al-Ansi, W., Mushtaq, B. S., Mahdi, A. A., Al-Maqtari, Q. A., Al-Adeeb, A., Ahmed, A. et al. (2021). Molecular structure, morphological, and physicochemical properties of highlands barley starch as affected by natural fermentation. *Food Chemistry*, 356, Article 129665. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129665
33. Yang, M., Wang, W., Wang, C., Tang, H., Li, Z. (2024). Structural and aroma profile enhancement of sorghum (*Sorghum bicolour* L. Moench) through lactobacillus plantarum fermentation. *Food Biophysics*, 20(1), Article 18. https://doi.org/10.1007/s11483-024-09912-z
34. Chung, S., Yao, H., Caito, S., Hwang, J.-w., Arunachalam, G., Rahman, I. (2010). Regulation of SIRT1 in cellular functions: Role of polyphenols. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, 501(1), 79–90. https://doi.org/10.1016/j.abb.2010.05.003
35. Zhao, T., Li, X., Zhu, R., Ma, Z., Liu, L., Wang, X. et al. (2019). Effect of natural fermentation on the structure and physicochemical properties of wheat starch. *Carbohydrate Polymers*, 218, 163–169. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.04.061
36. Tiwari, N., Saroj, R., Malik, M. A., Kaur, D. (2025). Effect of fermentation on bioactive compounds and structural properties of wheat bran. *Discover Food*, 5(1), Article 20. https://doi.org/10.1007/s44187-025-00292-y

| AUTHOR INFORMATION | СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ |
|---|---|
| **Affiliation** | **Принадлежность к организации** |
| **Ambika Chaudhary**, PG Scholar, Department of Food and Nutrition, Food Science and Technology, School of Home Science, Babasaheb Bhimrao Ambedkar University<br>Lucknow, Uttar Pradesh, 226025, India<br>E-mail: chaudharyambika839@gmail.com<br>ORCID: https://orcid.org/0009-0005-3955-1664 | **Чаудхари А.** — аспирант, кафедра пищевых продуктов и нутрициологии, пищевой науки и технологии, Школа домоводства, Университет Бабасахеба Бхимрао Амбедкара<br>226025, Индия, Уттар-Прадеш, Лакхнау<br>E-mail: chaudharyambika839@gmail.com<br>ORCID: https://orcid.org/0009-0005-3955-1664 |
| Neetu Singh, Professor, Head of the Department of Food and Nutrition, Food Science and Technology, School of Home Science, Babasaheb Bhimrao Ambedkar University<br>Lucknow, Uttar Pradesh, 226025, India<br>E-mail: neetubbau@gmail.com<br>ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5867-4268<br>* corresponding author | **Сингх Н.** — профессор, заведующий кафедрой пищевых продуктов и нутрициологии, пищевой науки и технологии, Школа домоводства, Университет Бабасахеба Бхимрао Амбедкара<br>226025, Индия, Уттар-Прадеш, Лакхнау<br>E-mail: neetubbau@gmail.com<br>ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5867-4268<br>* автор для контактов |
| **Alka Nanda**, Research Scholar, Department of Food and Nutrition, Food Science and Technology, School of Home Science, Babasaheb Bhimrao Ambedkar University<br>Lucknow, Uttar Pradesh, 226025, India<br>E-mail: alkananda610@gmail.com<br>ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5345-2882 | **Нанда А.** — научный сотрудник, кафедра пищевых продуктов и нутрициологии, пищевой науки и технологии, Школа домоводства, Университет Бабасахеба Бхимрао Амбедкара<br>226025, Индия, Уттар-Прадеш, Лакхнау<br>E-mail: alkananda610@gmail.com<br>ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5345-2882 |
| **Prashant Pandey**, Research Scholar, Department of Pharmaceutical Sciences, Babasaheb Bhimrao Ambedkar University<br>Lucknow, Uttar Pradesh 226025, India<br>Faculty of Pharmacy and Pharmaceutical Sciences, University of Alberta<br>Edmonton, Alberta T6G 2E1, Canada<br>E-mail: alkananda610@gmail.com<br>ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0700-914X | **Пандей П.** — научный сотрудник, кафедра фармацевтических наук, Университет Бабасахеба Бхимрао Амбедкара<br>226025, Индия, Уттар-Прадеш, Лакхнау<br>Кафедра фармации и фармацевтических наук, Университет Альберты<br>T6G 2E1, Канада, Эдмонтон, Альберта<br>E-mail: alkananda610@gmail.com<br>ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0700-914X |
| **Contribution** | **Критерии авторства** |
| Authors are 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/10.21323/2618-9771-2025-8-3-440-449

Поступила 08.10.2024
Поступила после рецензирования 25.09.2025
Принята в печать 29.09.2025
© Лоскутов С. И., Пухальский Я. В., Чукаева М. А., Воробьев Н. И., Виноградов З. С., Осипов А. И., Митюков А. С., Тютюма Н. В., Бондаренко А. Н., Ситнов В. Ю., 2025

https://www.fsjour.com/jour
Научная статья
Open access

# ВЛИЯНИЕ ОРГАНИЧЕСКИХ ЭКСТРАКТОВ НА РАЗВИТИЕ РАСТЕНИЙ ГУАРА (*CYAMOPSIS TETRAGONOLOBA* (L) TAUB) В УСЛОВИЯХ ЗАКРЫТОГО ГРУНТА

Лоскутов С. И.[1], Пухальский Я. В.[1]*, Чукаева М. А.[2], Воробьев Н. И.[3], Виноградов З. С.[4], Осипов А. И.[5], Митюков А. С.[6], Тютюма Н. В.[7], Бондаренко А. Н.[7], Ситнов В. Ю.[1]

[1] Всероссийский научно-исследовательский институт пищевых добавок, Санкт-Петербург, Россия
[2] Санкт-Петербургский Горный Университет Императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия
[3] Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной микробиологии, Санкт-Петербург — Пушкин, Россия
[4] Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений им. Н. И. Вавилова, Санкт-Петербург, Россия
[5] Агрофизический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия
[6] Институт озероведения Российской академии наук — обособленное структурное подразделение Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия
[7] Прикаспийский аграрный федеральный научный центр Российской академии наук, с. Соленое Займище, Астраханская обл., Россия

*КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:* *Cyamopsis tetragonoloba, зоогумус, фульвокислоты, морфологические показатели, элементный профиль, вычислительная нейросеть*

АННОТАЦИЯ

Гуар (*Cyamopsis tetragonoloba*) является ценной культурой, которую выращивают для получения камеди, используемой в пищевой промышленности. Биомасса гуара может применяться при кормлении животных. При этом по питательной ценности гуар не уступает соевому шроту. Главными критериями в выборе сорта гуара являются: скорость роста растений, выращенная биомасса растений и их питательная ценность. При выращивании гуара в условиях искусственного и закрытого грунта особое внимание должно уделяться органоминеральной удобрительной системе. В данной работе исследовалось влияние вытяжки из зоогумуса (ЗГ), производимого мухой черная львинка (*Hermetia illucens* Linnaeus) при переработке пищевых органических отходов, и фульвокислотной вытяжки (ФК) из озерного сапропеля на растения гуара. Было исследовано влияние трех типов органоминеральных удобрений на семь сортов гуара, взятых из коллекций ФГБНУ «Прикаспийский аграрный федеральный научный центр РАН», ВИР им. Н. И. Вавилова. Растения выращивали при регулируемом освещении и в условиях закрытого искусственного грунта. В контроле использовался минеральный раствор NPK Хогланда. В вариантах с применением органических удобрений доза раствора NPK Хогланда уменьшалась в 4 раза. По окончании 20-дневного опыта были измерены биометрические показатели и профили химических элементов в растениях. Профили химических элементов обрабатывались авторской вычислительной нейросетевой программой, которая рассчитывает безразмерный индекс когнитивной значимости CSI = 0…10 (Cognitive Salience Index), представляющий уровень фрактальной композиции химических элементов в растениях и скорость масс-накопительных биохимических процессов в них. Наибольшие значения индекса CSI отмечены в растениях гуара сортов Победа-17 и Авангард, выращенных при NPK + ФК. Растения гуара сорта Находка продемонстрировали наибольшую скорость масс-накопительных процессов при NPK + ЗГ. Это подтверждает целесообразность частичной замены минеральных удобрений органическими добавками.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Статья подготовлена в рамках выполнения исследований по государственному заданию № FGUS2024-0010 и № FGUS2025-0005 ФГБНУ «ФНЦ пищевых систем им. В. М. Горбатова» РАН.

Received 08.10.2024
Accepted in revised 25.09.2025
Accepted for publication 29.09.2025
© Loskutov S. I., Puhalsky J. V., Chukaeva M. A., Vorobiev N. I., Vinogradov Z. S., Osipov A. I., Mityukov A. S., Tyutyuma N. V., Bondarenko A. N., Sitnov V. Yu., 2025

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

# EFFECT OF ORGANIC EXTRACTS ON GROWTH OF GUAR PLANTS (*CYAMOPSIS TETRAGONOLOBA* (L) TAUB) IN CLOSED GROUND CONDITIONS

Svyatoslav I. Loskutov[1], Yan V. Puhalsky[1],* Maria A. Chukaeva[2], Nikolay I. Vorobyov[3], Zosim S. Vinogradov[4], Anatoly I. Osipov[5], Aleksey S. Mityukov[6], Natalia V. Tyutyuma[7], Anastasia N. Bondarenko[7], Veniamin Yu. Sitnov[1]

[1] All-Russian Research Institute of Food Additives, Saint Petersburg, Russia
[2] Saint-Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia
[3] All-Russia Research Institute for Agricultural Microbiology, Saint Petersburg, Russia
[4] Federal Research Center the N. I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, Saint Petersburg, Russia
[5] Agrophysical Research Institute, Saint Petersburg, Russia
[6] Institute of Limnology of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, Russia
[7] Precaspian Agrarian Federal Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, village Solenoe Zaimishche Astrakhan region, Russia

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: **Лоскутов, С. И., Пухальский, Я. В., Чукаева, М. А., Воробьев, Н. И., Виноградов, З. С., Осипов, А. И. и др.** (2025). Влияние органических экстрактов на развитие растений гуара (*Cyamopsis tetragonoloba* (l) taub) в условиях закрытого грунта. *Пищевые системы*, 8(3), 440–449. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-3-440-449

FOR CITATION: **Loskutov, S. I., Puhalsky, J. V., Chukaeva, M. A., Vorobiev, N. I., Vinogradov, Z. S., Osipov, A. I. et al.** (2025). Effect of organic extracts on growth of guar plants (*Cyamopsis tetragonoloba* (l) Taub) in closed ground conditions. *Food Systems*, 8(3), 440–449. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-3-440-449

*KEY WORDS:*
*Cyamopsis tetragonoloba, zoohumus, fulvic acids, morphological indicators, elemental profile, computational neural network*

ABSTRACT

Guar (*Cyamopsis tetragonoloba*) is a valuable crop grown to produce gum used in the food industry. At the same time, guar biomass can be used to feed animals. Guar is not inferior to soybean oil meal in nutritional value. The main criteria for choosing a guar variety are: plant growth rate, grown plant biomass and their nutritional value. When growing guar in artificial and closed ground, special attention should be paid to the organomineral fertilization system. In this paper, we studied an effect of zoohumus extract (ZG) produced by the Black Soldier fly (*Hermetia illucens* Linnaeus) during the processing of food organic waste, and fulvic acid extract (FA) from lake sapropel on guar plants. An effect of three types of organomineral fertilizers on seven guar varieties taken from the collections of the Caspian Agrarian Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences and the N. I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources (VIR) was studied. The plants were grown under controlled lighting and in closed artificial soil conditions. The control used a mineral solution of Hoagland's NPK. In the variants with the use of organic fertilizers, the dose of Hoagland's NPK solution was reduced by 4 times. At the end of the 20-day experiment, biometric indicators and profiles of chemical elements in the plants were measured. The profiles of chemical elements were processed by the authors' computational neural network program, which calculates the dimensionless index of cognitive significance CSI = 0…10 (Cognitive Salience Index), representing the level of fractal composition of chemical elements in plants and the rate of mass-accumulative biochemical processes in them. The highest CSI values were observed in guar plants of the Pobeda-17 and Avangard varieties grown with NPK + FA. Guar plants of the Nakhodka variety demonstrated the highest rate of mass accumulation processes with NPK+ZG. This confirms the feasibility of partial replacement of mineral fertilizers with organic additives.

FUNDING: The article was published as part of the research topic No. FGUS2024-0010 and No. FGUS2025-0005 of the state assignment of the V. M. Gorbatov Federal Research Center for Food Systems of RAS.

## 1. Введение

Гуар (*Cyamopsis tetragonoloba*) — это кустистое однолетнее растение, относящиеся к семейству бобовых (*Fabaceae*) [1]. Эту культуру в основном выращивают в Индии и Пакистане, чтобы получить стручки и семена для использования их в рационе животных, или как овощную и кормовую добавку к популярному кормовому соевому шроту [2–5]. Из эндосперма семян экстрагируют вязкий коллоидный раствор — гуаровую камедь, или гуаран [6]. Гуаран представляет собой полисахарид-галактоманнан, который используется в качестве загустителя и стабилизатора (Е412) в пищевой промышленности [7–10]. По химическому составу гуаровая мука подобна камеди рожкового дерева (пищевой добавке Е410). В перспективе высококонцентрированные белковые субстраты из гуара могут в дальнейшем заменить сою и пшеницу [11] и стать недорогим агропромышленным сырьем для производства инновационных продуктов для здорового питания человека. Листья гуара можно даже использовать как зеленую приправу в вегетарианском меню.

Для управления режимом питания растений и снижения накопления в них нитратов, поступающих из минеральных удобрений, в мировой практике земледелия стали применяться органоминеральные удобрения, в которых доля синтетической составляющей уменьшена за счет органических добавок. Данная удобрительная система не уступает по эффективности минеральной и способна обеспечивать растения всеми необходимыми эссенциальными элементами. Тем самым снижаются затраты на производство и повышаются экологические показатели качества конечного продукта. Ранее было установлено, что в состав органоминеральных удобрений при возделывании гуара могут включаться вытяжки гуминовых кислот [12–14], полученные из биогумуса и навоза КРС [15–17]. При этом в литературе недостаточно сведений об использовании вытяжек из зоогумуса как нового типа органических удобрений, получаемого путем биоконверсии пищевых отходов личинками синантропной мухи, черная львинка (*Hermetia illucens Linnaeus*, 1758) [18,19]. Известен единичный полевой опыт, проведенный в Индии (Хайдарабад, штат Телингана) [20].

Агрохимический анализ исходного сырья показал, что состав экскрементов насекомых соответствует стандартам качества, установленным ГОСТ 33830-2016[1] и ГОСТ Р 53117-2008[2] для органических удобрений, полученных в результате переработки органических отходов животноводства [21–23]. По содержанию биогенных элементов зоогумус не уступает птичьему помету и вермикомпосту, с которыми его также можно сочетать при формировании смешанной органической удобрительной добавки [24]. Установлено, что в зоогумусе *H. illucens* концентрация азота (20–130%), фосфора (60–80%) и калия (17–193%) была больше по сравнению с экскрементами других насекомых, в частности ширтоцерки (*Schistocerca gregaria*), тутового шелкопряда (*Bombyx mori*), полевого сверчка (*Scapsipedus icipe*) и мучного хрущака (*Tenebrio molitor*) [25]. Общее содержание элементов варьирует от 0,8 до 5,1% для азота, от 0,8 до 2,5% для фосфора и от 0,2 до 4,1% для калия соответственно [26,27]. Соотношение $N:P_2O_5:K_2O$ в удобрении составляет примерно 1 : 0,9 : 1,1 [28]. Основной формой азота является мочевая кислота, метаболизирующая до аммония ($NH_4^+$) и аммиака ($NH_3$), обладающих летучестью [29]. Низкое соотношение C : N в экскрементах относительно исходного субстрата обеспечивает высокую доступность элементов питания для растений [27,30,31]. По питательной ценности зоогумус сопоставим с аммиачной селитрой ($NH_4NO_3$) и может служить ее органической заменой [32]. Зоогумус не аккумулирует токсичные металлы, микотоксины или инсектициды [19,27,31]. Содержание органического вещества достигает 84,9%, что превышает таковое в навозе и в традиционных компостах [28]. Минеральная фракция богата не только макро-, но и эссенциальными микроэлементами. Однако содержание последних варьирует в зависимости от выбора рациона кормления личинок [19,26,33,34]. Микробиота зоогумуса представлена преимущественно сапрофитными микроорганизмами кишечника насекомых, до 80% которых составляют бактерии рода *Bacillus*, секретирующих фитогормоны [35]. Также они продуцируют антимикробные пептиды [36–40], благодаря чему зоогумус способен проявлять фунгицидные свойства [41]. Это особенно важно при выращивании сельскохозяйственных культур в тепличных условиях закрытого грунта, где борьба с фитопатогенными грибами весьма актуальна. Среди других полезных бактерий в составе зоогумуса были обнаружены *Sporosarcina* spp., *Corynebacterium* spp., *Lactobacillus* spp., *Actinobacteria* spp. и *Pseudomonas* spp [42].

Согласно литературному источнику [43], у зоогумуса имеется еще одно полезное качество для агрономии. Как компонент торфосмеси он способен улучшать физико-механические свойства субстрата и усиливать его влагоемкость. Такое свойство можно считать удачным при выращивании засухоустойчивый культур, которым является и гуар.

Идея использования экскрементов насекомых в качестве органического удобрения появилась относительно недавно. Однако в связи со значительным ростом производства данного сырья (до 3,4–3,9 млрд долл. к 2030 г) [42] популярность зоогумуса будет также увеличиваться.

В схему удобрительных добавок целесообразно включать также фульвокислотные вытяжки из озерных отложений — еще один тип физиологически активных соединений органической природы, оказывающих стимулирующее действие на рост и развитие растений [44–47]. Кроме того, они проявляют антифунгальное действие на фитопатогены [48]. Фульвокислоты не являются удобрением в традиционном понимании, а выступают в роли эффективных биостимуляторов и иммуномодуляторов. Их основной механизм действия включает усиление проницаемости плазмолемм и, что наиболее значимо, хелатирование биогенных элементов с образованием подвижных комплексонов. Это обеспечивает повышенную доступность и усвояемость питательных веществ корневой системой даже при их низкой концентрации в среде и при ограниченном содержании самих фульвокислот. Следствием является оптимизация питания растений, их адаптация к обедненным субстратам и снижение риска потери урожая.

Большинство биохимических исследований сосредоточено на изучении влияния удобрительных технологий для получения семенного материала и зеленой биомассы уже взрослых растений [49–55].

[1] ГОСТ 33830-2016 «Удобрения органические на основе отходов животноводства. Технические условия». М.: Стандартинформ, 2020. — 17 с.

[2] ГОСТ Р 53117-2008 «Удобрения органические на основе отходов животноводства. Технические условия». М.: Стандартинформ, 2020. — 18 с.

Работ по изучению влияния различных органических добавок на изменение режима питания гуара на раннем этапе их роста при этом не обнаружено. Последнее важно для первичного скрининга перспективных сортов и диагностики усвоения ими эссенциальных элементов на первичной фазе вегетации. Ответные реакции молодых (ювенильных) растений, как правило, определяют весь дальнейший цикл развития культуры и ее адаптационный потенциал в отношении устойчивости к различным стрессам.

В ювенильный период развития растений процессы формирования их органов контролируются на молекулярно-генетическом уровне и характеризуются сортоспецифичностью. Интенсивность их масс-накопительных процессов в основном зависит от объема биохимических веществ, поступающих в растения, и от скорости перемещения этих веществ по внутренним сосудам растений в составе питательных растворов. Чем больше биохимических веществ поступает в растения в единицу времени, тем быстрее формируются их органы и нарастает биомасса. Очевидно, что органоминеральные удобрения для растений должны содержать достаточное количество биохимических элементов в своем составе. Если хотя бы одного из химических элементов в составе удобрений будет недостаточно, растение будет развиваться неполноценно, что приведет к снижению качества и количества урожая.

На волне очередной информационно-коммуникационной революции (Индустрия 4.0), начавшейся в России, и на фоне развития методов биоинформатики все большее число исследователей прибегает к разработке нейросетей как мощного математического инструментария для анализа больших массивов (Big Data) эмпирических данных. В области физиологии растений это особенно актуально, поскольку на любом этапе роста нейросети позволяют быстро и эффективно обрабатывать данные и количественно оценивать когерентность внутреннего состояния (гомеостаза) растительной системы. Это имеет большое значение при изучении отзывчивости культур на новые типы органических удобрений.

Таким образом, цель настоящей работы связана с проведением нейросетевой оценки изменения связи масс-накопительных процессов с биохимическими параметрами молодых побегов гуара. Оценка проводилась под влиянием внесения в субстрат различных органических добавок в виде экстрактов, полученных из зоогумуса и фульвокислот.

## 2. Объекты и методы

Растения гуара выращивали в течение 20 суток в закрытом гроубоксе при полной светокультуре (Рисунок 1). Температура воздуха внутри рабочей зоны поддерживалась на уровнях 28 °C днем и 22 °C ночью. Влажность воздуха была в пределах 60–70 %. Источником освещения служил LED-светильник полного белого спектра с возможностью диммирования Zeus Pro 600W (Lumatek, Великобритания). Интенсивность света с высоты подвеса 1,2 м составила 36 800 Лк (551,7 ммоль/м 2 /с), фотопериод 16ч/8ч (день/ночь). Замеры инсоляции проводили с использованием спектрофотометра «Спектр» (ООО НКТ, Россия) и люксометра LX-1108 (Voltcraft, Германия). Эксперимент повторяли двукратно.

Для проведения опыта было взято семь сортов гуара (Таблица1) из коллекций Прикаспийского аграрного федерального научного центра РАН и Федерального исследовательского центра Всероссийский институт генетических ресурсов растений им. Н. И. Вавилова. Характеристика всех сортов приведена в Таблице 1.

Перед посевом семена гуара стерилизовали 5-процентным раствором гипохлорита натрия в течение 5 минут, после чего семена трижды тщательно промывали дистиллированной водой по стандартной методике [56].

Семена растений гуара высаживали по отдельности в каждую ячейку кассеты, содержащей 18 ячеек. Кассеты были заполнены нейтрализованным кокосовым субстратом, характеристика которого представлена в Таблице 2 [57]. После посева семян кассеты с растениями были выставлены в гроубокс.

В качестве удобрительного минерального раствора (NPK) использовали раствор Хогланда, приготовленный согласно рекомендации разработчика. Варианты с растениями, удобренными только раствором NPK, в исследовании рассматривались как контрольные. В опытных вариантах объемная доза удобрительного раствора NPK уменьшалась в 4 раза, а органические добавки вносились в компенсирующем объеме: 1,0 % вытяжка из зоогумуса (ЗГ) и 0,05 % экстракт фульвокислот (ФК) из озерного сапропеля.

Личинок *H. illucens* для получения сухих экскрементов разводили на базе лабораторного инсектария Всероссийского научно-исследовательского института пищевых добавок. Вытяжку фульвокислот (действующее вещество 19,2 %) получали путем кислотной экстракции из ультрадисперсной суспензии сапропеля (Псковская область, Россия), полученного в Институте озероведения РАН.

Минеральные и органоминеральные удобрения вносились в искусственный почвенный субстрат разово при посеве семян. Далее влажность почвенного субстрата везде поддерживали поливом фильтрованной водой. Элементный состав применяемых удобрений приведен в Таблице 3.

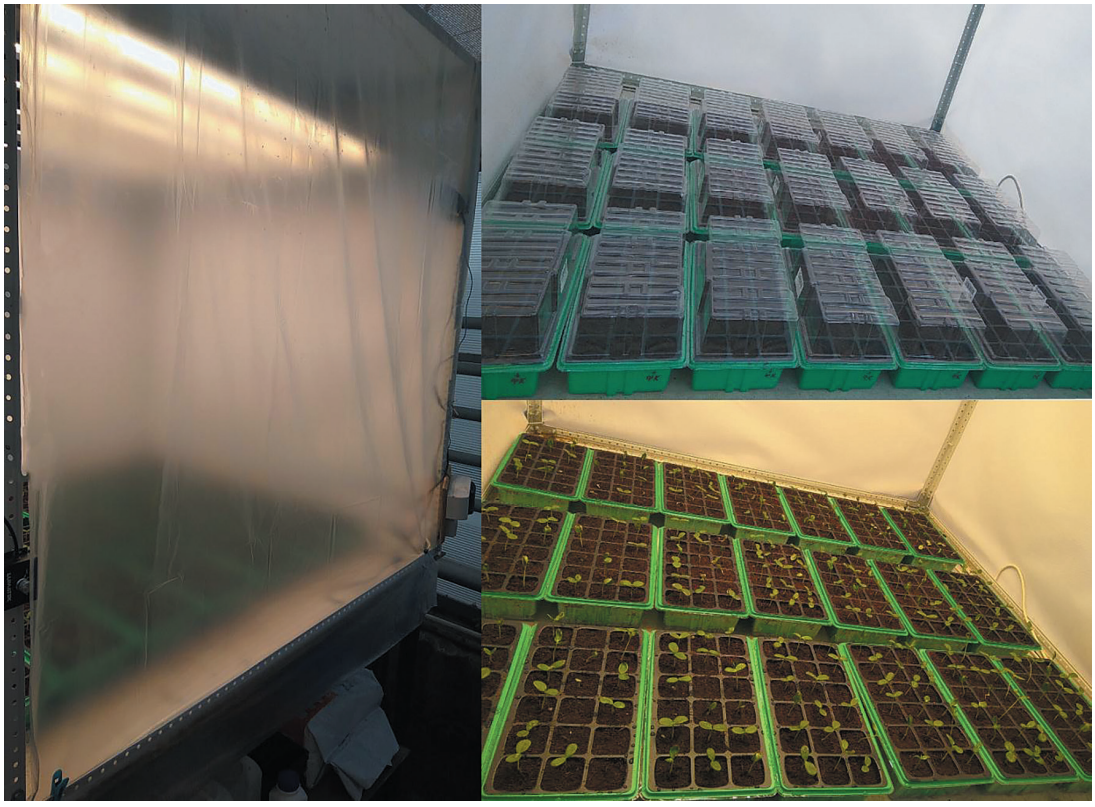


Рисунок 1. **Внешний вид постановки опыта по выращиванию гуара в закрытом гроубоксе**
Figure 1. **Photographs of the experimental setting for growing guar in the closed grow box**

Таблица 1. **Характеристика сортов гуара, используемых в работе**
Table 1. **Characteristics of the guar varieties used in the study**

| Сорт | Год урожая | Место репродукции | Содержание белка, % | Вегетационный период, дней | Описание |
|---|---|---|---|---|---|
| Авангард | 2020 | Астрахань | 26,0 | 120 | Среднеспелый ветвистый |
| Находка | 2021 | Кубань | 30,0 | 89 | Раннеспелый слабоветвистый |
| W15 | 2021 | Астрахань | 31,0 | 110 | Раннеспелый одностебельный |
| Крымский | 2021 | Астрахань | 31,0 | 110 | Раннеспелый слабоветвистый |
| Вир-21 | 2021 | Кубань | 31,0 | 109 | Раннеспелый одностебельный |
| Победа 17 | 2020 | Астрахань | 31,0 | 120 | Среднеспелый слабоветвистый |
| Победа 11 | 2021 | Астрахань | 31,0 | 110 | Раннеспелый одностебельный |

Таблица 2. **Физико-химическая характеристика кокосового субстрата, используемого для выращивания гуара в контролируемой среде**
Table 2. **Physico-chemical characteristics of the coconut substrate used for growing guar in the controlled environment**

| Физико-химические параметры | Значения |
|---|---|
| Плотность, кг/м$^3$ | 115,0 |
| Водоудерживающая способность, % | 64,0 |
| Электропроводность, мСм/см | 880,0 |
| $pH_{KCl}$ | 5,5 |
| Степень минерализации волокна, ppm | 400,0 |
| $NO_3$, г/кг сухого вещества | 2,6 |
| $NH_4$, г/кг сухого вещества | 1,7 |
| P, г/кг сухого веществ | 1,7 |
| K, г/кг сухого вещества | 80,4 |
| Ca, г/кг сухого вещества | 16,7 |
| Mg, г/кг сухого вещества | 5,7 |
| S, г/кг сухого вещества | 1,1 |
| Na, г/кг сухого вещества | 19,8 |
| Cl, г/кг сухого вещества | 77,5 |

Таблица 3. **Средние показатели элементного профиля удобрений, используемых в опыте**
Table 3. **Average indicators of the elemental profile of fertilizers used in the experiment**

| Элемент | Содержание, мг/л | | |
|---|---|---|---|
| | Раствор Хогланда | 1,0 % экстракт зоогумуса *H. Illucens* | 0,05 % раствор фульвокислот |
| Азот | 210,0 | 150,0 | 0,5 |
| Фосфор | 31,0 | 72,1 | 0,05 |
| Калий | 235,0 | 137,0 | 0,5 |
| Железо | 2,5 | 1,1 | 2,0 |
| Марганец | 0,5 | 0,8 | 0,003 |
| Бор | 0,5 | 0,1 | 0,002 |
| Молибден | 0,01 | 0,01 | 0,003 |
| Медь | 0,02 | 0,04 | 0,009 |
| Цинк | 0,05 | 0,01 | 0,002 |
| Кальций | 200 | 136,0 | 1,0 |
| Натрий | 0,01 | 3,7 | 0,31 |
| Магний | 48,0 | 40,0 | 0,2 |
| Сера | 64,0 | 77,7 | 0,5 |

По окончанию опыта измеряли высоту и массу каждого растения во всех вариантах. Также проводили анализ содержания химических элементов в зеленых побегах растений гуара. Для этого полученную растительную биомассу высушивали и измельчали до состояния пудры в агатовой ступке. Во фторопластовые сосуды отбирали навески по 0,2 г, добавляли по 5 мл концентрированной азотной кислоты и по 2 мл перекиси водорода, сосуды прикрывали часовыми стеклами и оставляли на час. После этого проводили мокрое озоление в системе микроволнового разложения Multiwave 3000 solv (Anton Paar, Австрия) по стандартной методике [58,59] согласно программе, представленной в Таблице 4.

Таблица 4. **Программа микроволнового разложения растительных проб**
Table 4. **Program of microwave decomposition of plant samples**

| Шаг | 1 | 2 | 3 |
|---|---|---|---|
| Температура, °C | 135 | 150 | 190 |
| Давление, бар | 60 | 60 | 60 |
| Мощность, Вт | 650 | 700 | 900 |
| Время нагрева, мин | 5 | 5 | 5 |
| Время выдержки, мин | 5 | 10 | 10 |

После остывания верхний супернатант без осадка с полученных растворов количественно переносили в мерные полиэтиленовые сосуды и доводили до метки 20 мл деионизированной водой. Для всех образцов велись две параллельные пробы, а также готовился холостой раствор. Применяемые реактивы имели квалификацию о. с. ч., а азотная кислота дополнительно была предварительно очищена в системе субперегонки кислот subCLEAN (Milestone, США) для уменьшения концентраций элементов в холостой пробе.

Полученные растворы анализировались методом атомно-эмиссионной спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой на приборе ICPE-9000 (Shimadzu, Япония) [60,61]. Для каждого элемента строилась градуировочная характеристика (коэффициент корреляции в каждом случае $R \geqslant 0{,}998$). В качестве стандартного раствора использовался многоэлементный раствор для ICP Sigma-Aldrich Merck.

Статистическую обработку с первичной оценкой коэффициента корреляции элементов по методу Пирсона проводили с помощью вычислительной программы Statistica v 10.0 (StatSoft Inc., США).

Результативность и скорость биохимических процессов, протекающих в растениях гуара, оценивались по величине безразмерного индекса когнитивной значимости CSI = 0…10 (Cognitive Salience Index) [62], который вычислялся с помощью авторской нейросетевой Excel-программы[3] (Рисунок 2).

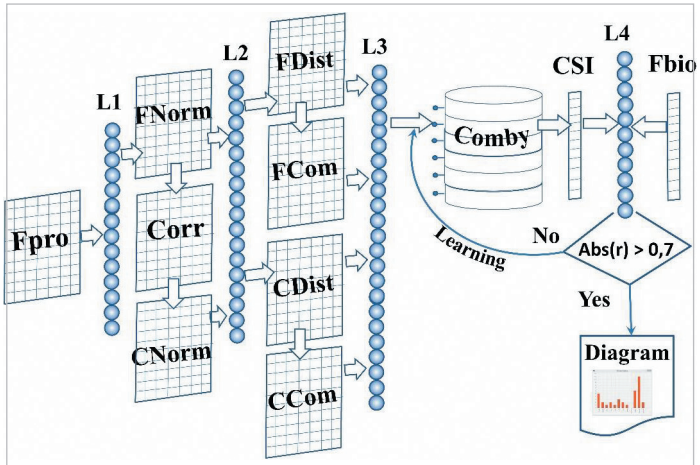



Рисунок 2. **Функциональная схема нейросетевой программы, вычисляющей индекс CSI. Learning — цикл обучения-поиска корректного вычисления индекса CSI, с использованием алгоритмов из базы Comby. L1-L4 — слои искусственных нейронов, выполняющих преобразование матриц. Diagram — графическая диаграмма, представляющая значения индекса CSI в вариантах опыта**
Figure 2. **Functional scheme of the neural network program that calculates the CSI index. Learning — the learning-search cycle of correct calculation of the CSI index using algorithms from the Comby base. L1-L4 — layers of artificial neurons performing matrix transformation. Diagram — the diagram presenting the values of the CSI index in the variants of the experiment**

[3] 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.

Программа была настроена и обучена преобразовывать методом «многие-к-одному» профили химических элементов растений гуара в индекс CSI. При этом учитывалось, что индекс CSI, с одной стороны, является продуктом преобразования профилей химических элементов в растениях, а с другой — отражает уровень фрактальной композиции химических элементов в растениях и интенсивность биохимических масс-накопительных процессов в растениях. По нашему предположению, фрактальная композиция химических элементов в растениях соответствует самому высокому уровню самоорганизации микробно-растительной биосистемы растений гуара и демонстрирует наиболее согласованное взаимодействие ризосферных микроорганизмов и растений. Вследствие этого происходит интенсивное и полноценное развитие растений. Таким образом, предоставляется возможность по значению индекса CSI выбирать наилучшие удобрительные агротехнологии, обеспечивающие максимально быстрое развитие растений гуара.

Нейросетевой программой выполняются следующие матричные преобразования по формулам:

$$FNorm = Normalization(Fpro), \quad (1)$$

$$Corr = Corrlation(FNorm), \quad (2)$$

$$CNorm = Normalization(Corr \times FNorm), \quad (3)$$

$$FDist = EuclidDistance(FNorm), \quad (4)$$

$$CDist = EuclidDistance(CNorm), \quad (5)$$

$$FCom = EigenVectors(FDist), \quad (6)$$

$$CCom = EigenVectors(CDist), \quad (7)$$

где: *Fpro* — концентрация химических элементов в растениях по вариантам опыта;

*FNorm, CNorm* — матрицы нормализованных данных матрицы *Fpro* и произведения матриц *FNorm* × *Corr*;

*Corr* — матрица коэффициентов корреляции между строками матрицы *FNorm*;

*FDist, CDist* — матрицы евклидовых дистанций между столбцами матриц *FNorm, Cnorm*, *Fcom;*

*CCom* — матрицы собственных векторов матриц *FDist, CDist;*

*FBio* — вектор биометрических данных растений по вариантам опыта;

*Normalization*() – функция построчной нормализации матричных данных;

*Correlation*() – функция вычисления коэффициентов корреляции между строками матриц;

*EulidDistance*() — функция вычисления дистанций между столбцами матриц;

*EigenVectors*() — функция вычисления собственных векторов матриц.

Особенностью нейросетевой программы являлся обязательный этап ее обучения [63–65], при выполнении которого реализуется поиск корректного алгоритма вычисления индекса CSI. Обучение нейросетевой программы становится возможным после активации сервиса Learning (Рисунок 2). Сервис Learning работает в автоматическом режиме и выполняет последовательную выборку из базы Comby алгебраических выражений, а затем по формуле выбранного выражения преобразует данные матриц *FNorm, CNorm, FDist, CDist, FCom, CCom* в индекс CSI. Циклические вычисления сервиса Learning могут завершиться только в том случае, когда значения индекса CSI достигнут или превысят уровень межвариантной корреляции с биометрическими данными растений Abs(r) > 0,7. Для повышения вероятности нахождения корректного алгоритма вычисления индекса CSI с помощью нейросетевой программы число записей в базе Comby увеличено до двух сотен.

С помощью бесплатной онлайн-программы SRplot [66], доступной по веб-серверу http://www.bioinformatics.com.cn/SRplot, также был проведен кластерный анализ с построением тепловой карты.

## 3. Результаты и обсуждение

Все проростки, выращенные на контроле, показали наихудший результат по всхожести (Рисунок 3). Наихудший результат на контроле показали сорта Авангард и Находка. Предпосевное внесение органических добавок в субстрат резко поменяло ситуацию, и данные сорта, наравне с Победой-11 и Победой-17, вышли на лидирующие позиции. Наименьшую всхожесть при органоминеральной удобрительной схеме продемонстрировали сорта W15, Крымский и ВИР-21.

Морфометрический анализ показал, что, несмотря на четырехкратное снижение дозы минеральных удобрений, проростки, выращенные с органическими добавками, существенно превосходили по высоте и биомассе растения контрольного образца. В среднем по сортам прибавка в высоте побегов на зоогумусе составила 17,6%, на фульвокислоте — 24,5% (Рисунок 4). Наилучшую отзывчивость

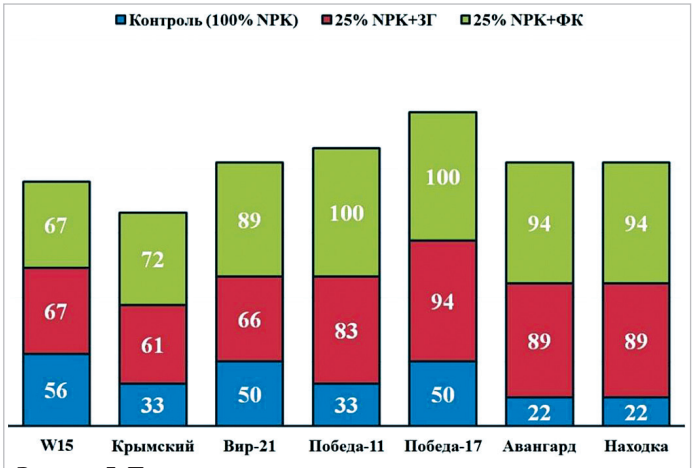



Рисунок 3. **Процент всхожести семян различных сортов гуара под влиянием органических добавок**

Figure 3. **Percent of germination of seeds from various guar varieties under the effect of organic additives**

показали сорта Победа-11, Находка и Авангард. Худший показатель отмечен для сорта W15. Прибавка в высоте у него в среднем при использовании органических добавок составила лишь 5,6%. Оценка полученного веса показала прибавку на 60,5% при внесении зоогумуса и на 55,5% при внесении фульвокислот. Наилучший результат отмечен для сорта Авангард (+111,2%), наихудший — для сорта Находка (+16,6%). По отзывчивости выбранных сортов на воздействие органических удобрений, используемых частично вместо минеральных для экологизации урожая, можно построить следующий убывающий ряд соотношений массы к высоте: Авангард > Победа-17 > ВИР-21 > W15 > Победа-11 > Крымский > Находка. Очевидно, что стимулирующий эффект органических добавок в большей степени обусловлен их гормональной активностью, которая дифференцирует режим питания и пролонгированно влияет на метаболизм растительных клеток. Таким образом, растение усваивает не весь комплекс элементов сразу: происходит их перераспределение во временной перспективе. Посредством хелатирования растения избирательно усваивают из обедненного субстрата и внесенного удобрения лишь те элементы, которые необходимы им в большей степени на определенном этапе вегетации.

Проведенный элементный анализ позволил выделить три элемента с повышением процента аккумуляции в зеленой биомассе молодых проростков всех сортов гуара под влиянием органических добавок — бор, калий и марганец (Таблица 5).

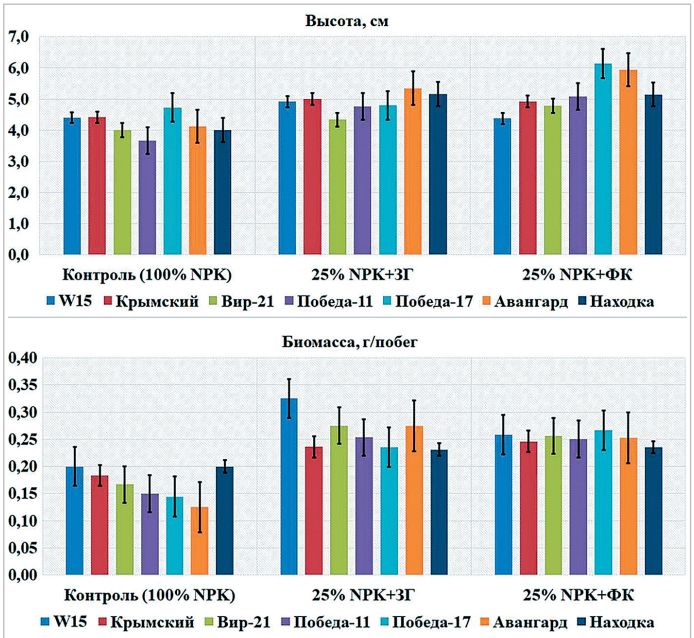



Рисунок 4. **Изменение морфометрических показателей роста различных сортов гуара под влиянием органических добавок**

Figure 4. **Changes in the morphometrical indicators of the growth of various guar varieties under the effect of organic additives**

Таблица 5. **Содержание элементов в зеленой биомассе побегов различный сортов гуара по вариантам опыта, мг/кг**
Table 5. **Content of elements in green biomass of sprouts of various guar varieties by the variants of the experiment, mg/kg**

| Вариант | Ca | P | Mg | Na | K | S | Fe | Zn | B | Ba | Cu | Ni | Mn | Mo | Co | Cr | Sr |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Авангард К | 1641 | 7751 | 2700 | 4302 | 42430 | 3009 | 130 | 41 | 19 | 1,9 | 5,8 | 2,4 | 24 | 5,5 | 1,9 | 1,4 | 7,4 |
| Авангард ЗГ | 1845 | 6072 | 2690 | 4648 | 50005 | 2567 | 144 | 35 | 24 | 3,1 | 7,6 | 4,1 | 30 | 5,2 | 3,8 | 3,4 | 7,8 |
| Авангард ФК | 1929 | 5691 | 2740 | 2311 | 51434 | 3118 | 129 | 34 | 33 | 2,8 | 5,3 | 0,68 | 35 | 3,7 | 0,62 | 0,82 | 7,7 |
| W15 К | 2002 | 8670 | 2625 | 4085 | 44379 | 2915 | 313 | 52 | 22 | 3,7 | 11 | 2,5 | 27 | 5,8 | 1,2 | 2,2 | 20 |
| W15 ЗГ | 1836 | 5711 | 2617 | 2652 | 50889 | 2411 | 278 | 38 | 26 | 3,7 | 5,6 | 2,3 | 27 | 4,6 | 0,81 | 1,6 | 16 |
| W15 ФК | 1777 | 6215 | 2348 | 2912 | 44810 | 3286 | 223 | 36 | 26 | 3,2 | 5,4 | 1,5 | 30 | 4,7 | 0,60 | 1,1 | 14 |
| ВИР 21 К | 1641 | 8641 | 3008 | 5816 | 66242 | 2744 | 155 | 49 | 27 | 2,5 | 9,0 | 1,8 | 23 | 4,0 | 1,7 | 3,6 | 12 |
| ВИР 21 ЗГ | 1592 | 5577 | 2879 | 2408 | 52501 | 2200 | 137 | 37 | 30 | 2,3 | 4,5 | 1,2 | 24 | 3,3 | 0,52 | 1,2 | 11 |
| ВИР 21 ФК | 1597 | 5997 | 2920 | 1695 | 47517 | 2989 | 148 | 37 | 30 | 2,7 | 4,5 | 1,0 | 28 | 3,7 | 0,48 | 1,0 | 10 |
| Находка К | 1591 | 7996 | 2448 | 3401 | 33851 | 2463 | 182 | 40 | 19 | 2,9 | 4,9 | 1,6 | 17 | 4,2 | 1,0 | 0,61 | 10 |
| Находка ЗГ | 1880 | 6442 | 3037 | 2611 | 56046 | 2502 | 173 | 41 | 34 | 3,1 | 4,7 | 2,1 | 27 | 3,3 | 2,3 | 1,2 | 9,8 |
| Находка ФК | 2091 | 6258 | 3027 | 3096 | 50929 | 2891 | 185 | 35 | 29 | 3,8 | 3,9 | 3,0 | 32 | 2,9 | 3,8 | 1,4 | 10 |
| Победа-17 К | 2063 | 8284 | 2716 | 3483 | 44918 | 2895 | 249 | 54 | 22 | 4,0 | 9,0 | 2,2 | 22 | 12 | 1,4 | 1,6 | 22 |
| Победа-17 ЗГ | 1754 | 5455 | 2769 | 2063 | 49402 | 2337 | 159 | 43 | 25 | 3,7 | 7,4 | 0,71 | 29 | 6,4 | 0,32 | 1,4 | 15 |
| Победа-17 ФК | 1815 | 6318 | 3001 | 1622 | 55652 | 3122 | 140 | 43 | 32 | 2,8 | 4,8 | 1,8 | 38 | 7,8 | 1,6 | 2,2 | 14 |
| Победа-11 К | 1926 | 7140 | 2422 | 3547 | 28687 | 2617 | 206 | 46 | 15 | 4,1 | 5,8 | 1,8 | 19 | 5,0 | 1,1 | 0,80 | 10 |
| Победа-11 ЗГ | 1819 | 5421 | 2478 | 2934 | 44441 | 2471 | 181 | 36 | 34 | 4,2 | 6,0 | 0,90 | 25 | 3,9 | 0,31 | 1,1 | 11 |
| Победа 11 ФК | 2211 | 6232 | 2809 | 2852 | 43783 | 3260 | 221 | 39 | 27 | 4,4 | 4,1 | 2,7 | 31 | 4,3 | 1,1 | 2,2 | 11 |
| Крымский К | 1967 | 7905 | 2684 | 3346 | 39276 | 2609 | 317 | 42 | 22 | 5,8 | 13 | 1,5 | 19 | 12 | 1,0 | 1,1 | 30 |
| Крымский ЗГ | 1618 | 5859 | 2624 | 3024 | 45479 | 2220 | 223 | 34 | 24 | 5,5 | 7,5 | 1,0 | 25 | 11 | 0,58 | 0,92 | 21 |
| Крымский ФК | 2038 | 6580 | 2873 | 2467 | 49053 | 3101 | 220 | 36 | 28 | 4,6 | 5,7 | 0,72 | 32 | 10 | 0,42 | 0,51 | 21 |
| Среднее | 1840 | 6677 | 2734 | 3108 | 47225 | 2749 | 196 | 40 | 26 | 3,6 | 6,5 | 1,8 | 27 | 5,9 | 1,3 | 1,5 | 14 |

*Примечание*: указаны средние значения. Ошибка средних везде составляет не более ± 5,0 %.

Обнаружена умеренная положительная взаимосвязь между основными макроэлементами: K-P ($r$ = 0,83), K-Mg ($r$ = 0,78). Это отражает их совместную роль в энергетическом метаболизме (АТФ), синтезе белков и хлорофилла. Также выявлена умеренная отрицательная корреляция между натрием и калием ($r$ = –0,51), подтверждающая известный физиологический антагонизм этих элементов при их поглощении и транспорте в растениях.

Проведенный кластерный анализ позволил сгруппировать сорта Победа-11, Победа-17, W15 и Крымский как наиболее отзывчивые по изменению в режиме питания. Сравнение результатов анализа элементного профиля с морфометрической градацией сортов на воздействие органических добавок также позволило выделить бор, марганец и калий на тепловой карте в единый гомогенный ряд совместно с магнием (Рисунок 5).

Калий являлся доминирующим макроэлементом в суммарном пуле нутриентов, составляя долю в 73 %. Данное трио элементов является необходимым для нормального роста и развития растений. В частности, бор необходим для ризогенеза и опыления цветов. Кроме того, бор участвует в транспорте других ионов через клеточные мембраны [67]. Его накопление в тканях опосредовано физиологическими и молекулярными связями. Марганец участвует в усвоении углекислого газа при дыхании растений и в процессе фотосинтеза. Он помогает в синтезе хлорофилла, усвоении нитрата и переносе электронов во время фотосинтеза. Также он активирует жирообразующие ферменты и участвует в образовании рибофлавина, аскорбиновой кислоты и каротина [68]. Наконец, калий принимает участие в регуляции водного режима растений, в синтезе углеводов, в метаболизме азота и углерода [69,70]. Было обнаружено, что калий обеспечивает устойчивость к абиотическому стрессу. В условиях солевого стресса калий помогает поддерживать ионный гомеостаз и регулировать осмотический баланс в растениях. В условиях засухи калий контролирует открытие/закрытие корневых устьиц, регулирующих движение потоков растворов питательных веществ по сосудам растений, что способствует адаптации растений к условиям дефицита воды в окружающей среде [71].

Ранее была продемонстрирована положительная роль этих элементов, применяемых как по отдельности, так и в комбинации, в виде чистых солей или их гуминовых соединений для накопления сухого вещества и урожайности картофеля (*Solanum tuberosum*) [72–74] и барбариса (*Berberis vulgaris L.*) [75]. Все они способны образовывать хелатные комплексы с аминокислотами, такими как аспарагин, глицин, аланин и серин, которые участвуют в делении клеток и синтезе природных фитогормонов роста, включая ауксины, цитокинины и гиббереллины [76]. Это подтверждает, что повышенное накопление этих элементов в побегах может быть связано с присутствием в органических добавках гормоноподобных веществ и указанных аминокислот, которые влияют на иммунную систему растений на ранних стадиях их роста.

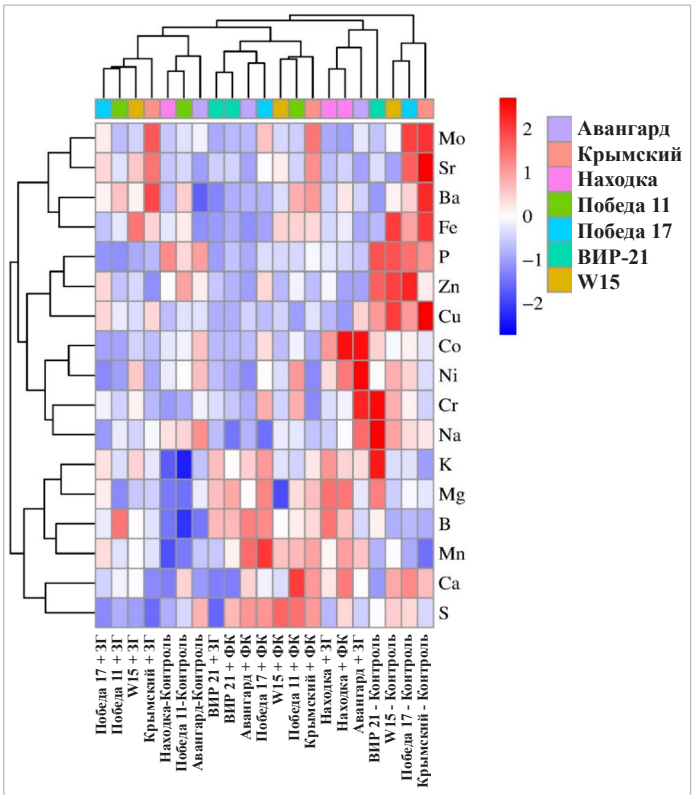



Рисунок 5. **Тепловая карта кластерного родства изученных сортов гуара по элементному составу**
Figure 5. **Heat map of cluster relatedness of the studied guar varieties by the elemental composition**

Сильные положительные связи между B-K-Mn-Mg ($r$ = 0,83–0,91) и морфометрическими показателями свидетельствуют об их совместном участии в метаболических путях, связанных с биосинтезом клеточных стенок и с осморегуляцией.

Чистая фульвокислота увеличивает проницаемость клеточных мембран в большей мере, чем ее вероятное связанное количество в зоогумусе, поэтому у подавляющего числа сортов суммарное накопление пула биогенных элементов в биомассе выше (Рисунок 6). Важно отметить, что у сорта Находка, имеющего наименьший показатель набора массы, наблюдается наибольшая степень аккумуляции элементов в побегах. Прибавка от внесения зоогумуса здесь составила 39,9 %, от фульвокислот — 84,5 %. Второе место по аккумуляции элементов в побегах занимает сорт Победа-11 (с показателями 28,3 % и 69,1 % относительно контроля соответственно). У сорта Авангард эти показатели были не столь ярко выражены. Этот результат означает, что биомасса растения, являясь важным признаком селективности сорта, не всегда полноценно отображает изменения в его биохимическом составе и питательной ценности. Отмечено снижение накопления элементов в биомассе растений сорта ВИР 21 под воздействием органических добавок, что указывает на отсутствие у него отзывчивости к системе экологического возделывания и большую адаптированность к применению минеральных удобрений.

В начальный ювенильный период развития растений в них в основном формируются зачатки всех органов растений, а на последующих этапах развития происходит накопление клеточной биомассы органов делением растительных клеток без изменения их биохимического состава. На последующих этапах развития растений происходят масснакопительные процессы, представляющие собой деление идентичных клеток, в которых будет сохраняться неизменным соотношение химических элементов. Следовательно, профиль биохимических элементов, сформированный в растениях в начальный ювенильный период, будет сохраняться в растениях и на последующих этапах развития. Если реальный биохимический профиль совпадает с проектным профилем, то мы считаем, что в растениях сформируется идеальная фрактальная композиция химических элементов, при которой растение будет развиваться максимально быстро [77].

Нейросетевой анализ показал, что наибольшая интенсивность масснакопительных и биохимических процессов наблюдается у гуара сорта Победа-17 при обогащении субстрата ФК. При внесении ЗГ наибольшая когерентность или согласованность режима питания и накопления зеленой биомассы наблюдается у гуара сорта Находка. Сорт Авангард на обоих органических фонах занимал второе место (Рисунок 7).

Изученные органические добавки также могут быть совместно использованы с изученными к настоящему моменту времени штаммами ризобактериями, выделенными из клубеньков гуара и принадлежащими к родам *Bradyrhizobium* и *Ensifer* [78]. Помимо дифференциации применения минеральных удобрений, стимуляции роста всходов, экстракты зоогумуса и фульвокислот сапропеля могут быть использованы здесь как модифицирующие добавки и стабилизаторы титра жизнеспособных клеток бактерий в биотехнологии создания эффективных азотфиксирующих симбиосистем на основе гуара [79]. Изучение процессов в микробно-растительных биосистемах под влиянием органоминеральных удобрений и микробиологических препаратов является задачей будущих исследований.

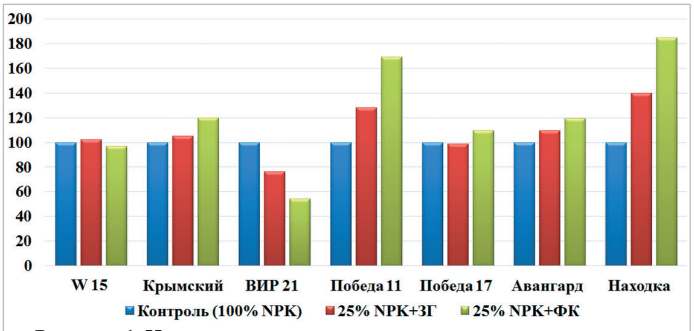



Рисунок 6. **Изменение суммарного накопления элементов в зеленой биомассе побегов различных сортов гуара под влиянием органических добавок, %**

Figure 6. **Changes in the total accumulation of elements in the green biomass of sprouts of various guar varieties under the effect of organic additives, %**

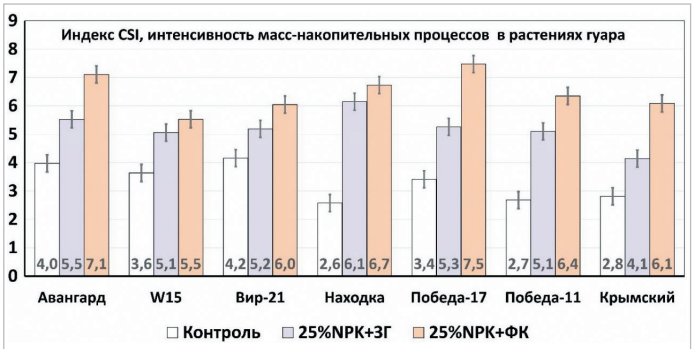



Рисунок 7. **Значения индекса CSI, представляющего интенсивность масс-накопительных процессов в молодых побегах гуара по вариантам опыта**

Figure 7. **Values of the CSI index presenting the intensity of the mass accumulation processes in the young sprouts of guar by the variants of the experiment**

## 4. Выводы

На основании проведенных исследований можно отметить, что морфометрические показатели роста побегов различных сортов гуара, выращенных с применением органоминеральных добавок, существенно превышали контроль с использованием минеральных удобрений. В среднем по сортам прибавка в высоте побегов на зоогумусе составила 17,6 %, на фульвокислоте — 24,5 %. По итогу работы можно выделить сорта Находка и Авангард как наиболее перспективные для дальнейшего возделывания по данной технологии с целью снижения себестоимости и повышения экологичности урожая. При этом известно, что сорт Находка практически не поражается болезнями и не повреждается вредителями. Основное применение этого растения — получение эфирных масел и использование в декоративных целях. Для экологически чистого зеленого корма рекомендуется выбирать сорт Авангард.

Современные исследования в области физиологии растений подчеркивают необходимость комплексной оценки не только абсолютных показателей продуктивности, но и структурной согласованности метаболических процессов. Использование нейросетей как дополнительного математического инструментария позволяет минимизировать риски использования внешних ресурсов (удобрений) и максимально задействовать вводные локальные факторы (органику, источники энергии, аэрации и пр.) при моделировании условий внешней среды и прогнозировании урожаев. Рассчитанные индексы CSI показали большую отзывчивость сорта Находка на прибавку в биомассе под влиянием зоогумуса. На фоне фульвокислот значения его индексов немного уступали сортам Авангард и Победа-17, при этом опережали их в суммарном пуле накопления биогенных элементов, главным образом за счет повышенной аккумуляции в побегах бора, марганца и калия. Кластеризация B-K-Mn-Mg, формирующая функциональный модуль, ответственна за 78% вариации индекса структурной когерентности (CSI). Выявленная положительная корреляция между содержанием марганца и CSI-индексом ($r = 0{,}92$) может объясняться его ключевой ролью в активации супероксиддисмутазы, регулирующей окислительно-восстановительный баланс в условиях биотического стресса. Синергия элементов B, K и Mn, выявленная в нашем исследовании, согласуется с результатами исследований других бобовых культур, где данный элементный комплекс связан с эффективностью азотфиксации.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК/ REFERENCES


1. Whistler, R. L., Hymowitz, T. (1979). Guar: Agronomy, Production, Industrial Use and Nutrition. Purdue University Press, Indiana, 1979.
2. Костенкова, Е. В., Рейнштейн, Л. Н., Остапчук, П. С. (2015). Применение *Cyamopsis Tetragonoloba* (L.) в кормлении сельскохозяйственных животных, птицы и рыб: проблемы и перспективы. *Таврический вестник аграрной науки*, 2(4), 108–117. [Kostenkova, E. V., Reinshtein, L. N., Ostapchuk, P. S. (2015). The problems and perspectives of application of *Cyamopsis Tetragonoloba* (L.) in feeding of agricultural animals, birds and fish. *Taurida Herald of the Agrarian Sciences*, 2(4), 108–117. (In Russian)]
3. Chiofalo, B., Presti, V. L., D'Agata, A., Rao, R., Ceravolo, G., Gresta, F. (2018). Qualitative profile of degummed guar (*Cyamopsis tetragonoloba* L.) seeds grown in a Mediterranean area for use as animal feed. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition*, 102(1), 260–267. https://doi.org/10.1111/jpn.12687
4. Biel, W., Jaroszewska, A. (2019). Compositional and nutritional evaluation of guar (*Cyamopsis tetragonoloba* L.) meal. *Animal Nutrition and Feed Technology*, 19(3), 385–393. https://doi.org/10.5958/0974-181X.2019.00036.2
5. Gautam, R., Verma, A. K., Dwivedi, S., Jhang, T. (2024). Breeding guar [*Cyamopsis tetragonoloba* (L.) Taub]: A variety compendium of a multifaceted industrial crop

for resource-constrained scenario in India. *Industrial Crops and Products*, 214, Article 118502. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.118502
6. Дзюбенко, Е. А., Сафронова, В. И., Вишнякова, М. А. (2023). Селекция гуара в Российской Федерации в связи с перспективой производства отечественной камеди (обзор). *Сельскохозяйственная биология*, 58(1), 43–59. [Dzyubenko, E. A., Safronova, V. I., Vishnyakova, M. A. (2023). Objectives of guar breeding in the Russian Federation in connection with the prospects of domestic guar gum production (review). *Agricultural Biology*, 58(1), 43–59. (In Russian)] https://doi.org/10.15389/agrobiology.2023.1.43rus
7. Sharma, P., Gummagolmath, K. C. (2012). Reforming guar industry in India: Issues and strategies. *Agricultural Economics Research Review*, 25, 37–48.
8. Mudgil, D., Barak, S., Khatkar, B. S. (2014). Guar gum: Processing, properties and food applications — A Review. *Journal of Food Science and Technology*, 51(3), 409–418. https://doi.org/10.1007/s13197-011-0522-x
9. Баюров, Л. И., Дмитриенко, С. Н. (2023). Гуар и его использование в питании людей и животных. *Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета*, 192, 22–39. [Bayurov, L. I., Dmitrienko, S. N. (2023). Guar and its importance in the nutrition of people and animals. *Polythematic Online Scientific Journal of Kuban State Agrarian University*, 192, 22–39. (In Russian)]
10. Tahmouzi, S, Meftahizadeh, H, Eyshi, S, Mahmoudzadeh, A, Alizadeh, B, Mollakhalili-Meybodi N. et al. (2023). Application of guar (*Cyamopsis tetragonoloba* L.) gum in food technologies: A review of properties and mechanisms of action. *Journal of Food Science and Nutrition*, 11(9), 4869–4897. https://doi.org/10.1002/fsn3.3383
11. Kotnala, B., Panneerselvam, V., Vijayakumar, A. K. (2024). Physicochemical, structural, and functional characterization of guar meal protein isolate (*Cyamopsis tetragonoloba*). *Heliyon*, 10(3), Article e24925. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e24925
12. Fazeli-Nasab, B., Khajeh, H., Piri, R., Moradian, Z. (2023). Effect of humic acid on germination characteristics of *Lallemantia royleana* and *Cyamopsis tetragonoloba* under salinity stress. *Iranian Journal of Seed Research*, 9(2), 51–62. https://doi.org/10.61186/yujs.9.2.51
13. Ahmadi, S., Hatamzadeh, A., Biglueii, M. H., Sahraroo, A. (2017). Effect of humic acid on some morphological traits of Guar (*Cyamopsis tetragonoloba*) in Karaj region. *Journal of Biodiversity and Environmental Sciences (JBES)*, 11(1), 287–295.
14. Ahmadi, F., Telavat, M. R. M., Siadat, S. A., Moshattati, A. (2019). Effect of different concentrations of humic acid on guar (*Cyamopsis tetragonoloba* L.) yield and nutrients uptake in different sowing densities. *Journal of Crop Production and Processing*, 9(1), 33–49. https://doi.org/10.29252/jcpp.9.1.33
15. Yashraj, Singh, M. K., Katiyar, H., Tyagi, V., Vinayak, Tomar, H. et al. (2023). The effect of integrated nutrient management on various growth parameters of cluster bean (*Cyamopsis tetragonoloba* L.). *International Journal of Environment and Climate Change*, 13(10), 3427–3431. https://doi.org/10.9734/ijecc/2023/v13i103011
16. Karthikeyan, M., Gajalakshmi, S., Abbasi, S. A. (2014). Comparative efficacy of vermicomposted paper waste and inorganic fertilizer on seed germination, plant growth and fruition of *Cyamopsis tetragonoloba*. *Journal of Applied Horticulture*, 16(1), 40–45. https://doi.org/10.37855/jah.2014.v16i01.05
17. Дашко, Р. Э., Власов, Д. Ю., Пушина, З. В., Утенкова, Т. Г., Иванов, С. Л. (2023). Многокомпонентный состав сапропелей как основа для совершенствования техники и технологии их дегидратации. *Russian Journal of Earth Sciences*, 23(2), Статья ES2002. [Dashko, R., Vlasov, D., Pushina, Z., Utenkova, T., Ivanov, S. (2023). Multicomponent composition of sapropels as a basis for perfection of technique and technology of their dehydration. *Russian Journal of Earth Sciences*, 23(2), Article ES2002. (In Russian)] https://doi.org/10.2205/2023ES000840
18. 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
19. Elissen, H., van der Weide, R., Gollenbeek, L. (2023). Effects of black soldier fly frass on plant and soil characteristics: A literature overview. Wageningen Plant Research, Report WPR-996.
20. Vasavi, G., Arunakumari, J., Reddy, G. K., Nirmala, A., Anitha, V. (2024). Impact of black soldier fly larval frass on growth and yield of cluster bean (*Cyamopsis Tetragonoloba* L.). *International Journal of Plant and Soil Science*, 36(8), 854–863. https://doi.org/10.9734/ijpss/2024/v36i84916
21. 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
22. Песцов, Г. В., Третьякова. А. В., Прокудина. О. В. (2022). Экологически безопасная утилизация отходов сельского хозяйства с использованием насекомого вида *Hermetia illucens*. *Биосфера*, 14(4), 362–364. [Pestsov, G. V., Tretyakova, A. V., Prokudina, O. V. (2022). Environmentally safe disposal of agricultural waste using the insect species *Hermetia illucens*. *Biosfera*, 14(4), 362–364. (In Russian)] https://doi.org/10.24855/biosfera.v14i4.696
23. Arnone, S., De Mei, M., Petrazzuolo, F., Musmeci, S., Tonelli L., Salvicchi A. et al. (2022). Black soldier fly (*Hermetia illucens* L.) as a high-potential agent for bioconversion of municipal primary sewage sludge. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(43), 64886–64901. https://doi.org/10.1007/s11356-022-20250-w
24. Rehman, S. ur, De Castro, F., Aprile, A., Benedetti, M., Fanizzi, F. P. (2023). Vermicompost: Enhancing plant growth and combating abiotic and biotic stress. *Agronomy*, 13(4), Article 1134. https://doi.org/10.3390/agronomy13041134
25. Beesigamukama, D., Subramanian, S. Tanga, C. M. (2022). Nutrient quality and maturity status of frass fertilizer from nine edible insects. *Scientific Reports*, 12, Article 7182. https://doi.org/10.1038/s41598-022-11336-z
26. Lopes, I. G., Yong, J. W., Lalander, C. (2022). Frass derived from black soldier fly larvae treatment of biodegradable wastes. A critical review and future perspectives. *Waste Management*, 142, 65–76. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.02.007
27. Basri, N. E. A., Azman, N. A., Ahmad, I. K., Suja, F., Jalil, N. A. A., Amrul, N. F. (2022). Potential applications of frass derived from black soldier fly larvae treatment of food waste: A review. *Foods,* 11(17), Article 2664. https://doi.org/10.3390/foods11172664
28. Gärttling, D., Schulz, H. (2021). Compilation of black soldier fly frass analyses. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 22(1), 937–943. https://doi.org/10.1007/s42729-021-00703-w
29. Green, T. R., Popa, R. (2012). Enhanced ammonia content in compost leachate processed by black soldier fly larvae. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 166(6), 1381–1387. https://doi.org/10.1007/s12010-011-9530-6
30. Jalil, N. A. A., Abdullah, S. H., Ahmad, I. K., Basri, N. E. A., Mohamed, Z. S. (2021). Decomposition of food waste from protein and carbohydrate sources by black soldier fly larvae, *Hermetia illucens* L. *Journal of Environmental Biology*, 42(3(SI)), 756–761. https://doi.org/10.22438/jeb/42/3(SI)/JEB-04
31. Sarpong, D., Oduro-Kwarteng, S., Gyasi, S. F., Buamah, R., Donkor, E., Awuah, E. et al. (2019). Biodegradation by composting of municipal organic solid waste into organic fertilizer using the black soldier fly (*Hermetia illucens*) (Diptera: Stratiomyidae) larvae. *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture*, 8(S1), 45–54. https://doi.org/10.1007/s40093-019-0268-4
32. Schmitt, E., de Vries, W. (2020). Potential benefits of using *Hermetia illucens* frass as a soil amendment on food production and for environmental impact reduction. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 25, Article 100335. https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2020.03.005
33. Surendra, K., Tomberlin, J. K., van Huis, A., Cammack, J. A., Heckmann, L.-H. L., Khanal, S. K. (2020). Rethinking organic wastes bioconversion: Evaluating the potential of the black soldier fly (*Hermetia illucens* (L.)) (Diptera: Stratiomyidae) (BSF). *Waste Management*, 117, 58–80. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.07.050
34. Scala, A., Cammack, J. A., Salvia, R., Scieuzo, C., Franco, A., Bufo, S. A. et al. (2020). Rearing substrate impacts growth and macronutrient composition of *Hermetia illucens* (L.) (Diptera: Stratiomyidae) larvae produced at an industrial scale. *Scientific Reports*, 10(1), Article 19448. https://doi.org/10.1038/s41598-020-76571-8
35. Poveda, J., González-Andrés, F. (2021). Bacillus as a source of phytohormones for use in agriculture. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 105(23), 8629–8645. https://doi.org/10.1007/s00253-021-11492-8
36. Zhang, Y., Meng, Z., Li, S., Liu, T., Song, J., Li, J. et al. (2023). Two antimicrobial peptides derived from bacillus and their properties. *Molecules*, 28(23), Article 7899. https://doi.org/10.3390/molecules28237899
37. Puan, S. L., Erriah, P., Baharudin, M. M. A., Yahaya, N. M., Kamil, W. N. I. W. A., Ali, M. S. M. et al. (2023). Antimicrobial peptides from Bacillus spp. and strategies to enhance their yield. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 107(18), 5569–5593. https://doi.org/10.1007/s00253-023-12651-9
38. Choyam, S., Jain, P. M., Kammara, R. (2021). Characterization of a potent new-generation antimicrobial peptide of bacillus. *Frontiers in Microbiology*, 12, Article 710741. https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.710741
39. Tran, Q. V., Pakina, E. N., Ha, C. V. (2024). Identification of antimicrobial peptide biosynthetic genes of *Bacillus pumilus* in suppression of *Phytophthora* spp. *Far Eastern Agricultural Journal*, 18(2), 80–88. https://doi.org/10.22450/1999-6837-2024-18-2-80-88
40. Sumi, C. D., Yang, B. W., Yeo, I.-C., Hahm, Y. T. (2015). Antimicrobial peptides of the genus Bacillus: A new era for antibiotics. *Canadian Journal of Microbiology*, 61(2), 93–103. https://doi.org/10.1139/cjm-2014-0613
41. Arabzadeh, G., Delisle-Houde, M., Vandenberg, G. W., Derome, N., Deschamps, M.-H., Dorais, M. et al. (2023). Assessment of antifungal/anti-oomycete activity of frass derived from black soldier fly larvae to control plant pathogens in horticulture: Involvement of *Bacillus velezensis*. *Sustainability*, 15, Article 10957. https://doi.org/10.3390/su151410957
42. Siddiqui, S. A., Gadge, A. S., Hasan, M., Rahayu, T., Povetkin, S. N., Fernando, I. et al. (2024). Future opportunities for products derived from black soldier fly (BSF) treatment as animal feed and fertilizer — A systematic review. *Environment, Development and Sustainability*, 26, 30273–30354. https://doi.org/10.1007/s10668-024-04673-8
43. Пендюрин, Е. А., Сапронова, Ж. А., Токач, Ю. Е. (2023). Зоокомпост личинок мухи черная львинка как влагоудерживающий агент в почвах. *Природообустройство*, 3, 59–65. [Pendyurin, E.A., Sapronova, Zh. A., Tokach, Yu. E. (2023). Zoocompost of black lion fly larvae as a moisture-retaining agent in soils. *Prirodoobustrojstvo*, 3, 59–65. (In Russian)] https://doi.org/10.26897/1997-6011-2023-3-59-65
44. Чилачава, К. Б., Песцов, Г. В., Муравлев, Н. С., Глазунова, А. В., Бойкова, О. В. (2019). Изучение фунгицидных свойств фульвовых кислот. *Аграрная наука*, 2, 172–174. [Chilachava, K. B., Pestsov, G. V., Glazunova, A. V., Muravlev, N. S., Boykova, O. V. (2019). Study of the fungicidal properties of fulvic acids. *Agrarian Science*, 2, 172–174. (In Russian)] https://doi.org/10.32634/0869-8155-2019-326-2-172-174
45. Kamel, S. M., Afifi, M. M. I., El-Shoraky, F. S., El-Sawy, M. M. (2014). Fulvic acid: A tool for controlling powdery and downy mildew in cucumber plants. *International Journal of Phytopathology*, 3(2), 101–104. https://doi.org/10.33687/phytopath.003.02.0866
46. Vanimuthu, K., Kavitha, K., Paul, J. A. J., Kumar, P., Gowrishankar, S., Balachandar, R. et al. (2024). Isolation, characterization and antifungal behavior of humic acid and fulvic acid fractions from biowaste derived vermiproducts. *Research Square*, Preprint Article. https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-4221685/v1
47. Удалова, О. Р., Мирская, Г. В., Конончук, П. Ю., Панова, Г. Г. (2021). О влиянии растворов фульвокислот из сапропеля на растения салата при различных видах его обработки. *Аграрный вестник Урала*, 06(209), 22–33. [Udalova, O. R., Mirskaya, G. V., Kononchuk, P. Yu., Panova, G. G. (2021). About the influence of solutions of fulvic acids from sapropel on lettuce plants in various types of its processing, *Agrarian Bulletin of the Urals*, 06(209), 22–33. (In Russian)] https://doi.org/10.32417/1997-4868-2021-209-06-22-33
48. Barakova, N. V., Sharova, N. Y., Juskauskajte, A. R., Mityukov, A. S. Romanov, V. A., Nsengumuremyi, D. (2017). Fungicidal activity of ultradisperse humic sapropel suspensions. *Agronomy Research*, 15(3), 639–648. https://doi.org/10.17586/2310-1164-2019-12-3-25-31

49. Akçura, M., Müftüoğlu, N. M., Kaplan, M., Türkmen, C. (2020). Nutrient potential and mineral contents of some vegetable cluster bean genotypes. *Cereal Chemistry*, 97(6), 1193–1203. https://doi.org/10.1002/cche.10341
50. Kuniya, N., Patel, B. B., Malav, J. K., Chaudhary, N., Pavaya, R. P., Patel, J. K. et al. (2019). Yield and nutrient content and uptake by cluster bean (*Cyamopsis tetragonoloba* L.) as influenced by different levels of sulphur and zinc application under light textured soil. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 8(3), 2160–2163.
51. Manohar, C. V. S., Sharma, O. P., Verma, H. P. (2018). Nutrient status and yield of cluster bean [*Cyamopsis tetragonoloba* (L.) Taub] as influenced by fertility levels and liquid biofertilizers. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry,* 7(5), 1840–1843.
52. Müftüoğlu, N. M., Çikili, Ya., Türkmen, C., Akçura, M. (2022). Molibden uygulamasının sakız fasulyesinin (*Cyamopsis tetragonoloba* l.) farklı organlarında bazı besin elementleri miktarına etkisi. *Journal of Advanced Research in Natural and Applied Sciences*, 8(1), 1–7. (In Turkish). https://doi.org/10.28979/jaarnas.91062
53. Tiwari, D. K., Pareek, B. L., Singh B. (2017). Effect of sulphur and iron levels on yield and nutrient content and uptake of Clusterbean [*Cyamopsis tetragonoloba* (L.) Taub.] in arid region of Rajasthan. *Annals of Agricultural Research*, 38(2).
54. Virro, I., Arak, M., Maksarov, V., Olt, J. (2020). Precision fertilisation technologies for berry plantation. *Agronomy Research*, 18(S4), 2797–2810. https://doi.org/10.15159/AR.20.207
55. Vasilyeva, M., Kovshov, S., Zambrano, J., Zhemchuzhnikov, M. (2021). Effect of magnetic fields and fertilizers on grass and onion growth on technogenic soils. *Journal of Water and Land Development*, 49, 55–62. https://doi.org/10.24425/jwld.2021.137096
56. Hypochlorite, S., Singh, B. K., Ali, M. N., Samanta, S., Mandal, N. A (2021). Comparative analysis among different surface sterilisation methods for rice invitro culture. *International Journal of Plant and Soil Science*, 33(17), 148–154. https://doi.org/10.9734/ijpss/2021/v33i1730559
57. 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
58. Pashkevich, M. A., Bech, J., Matveeva, V. A., Alekseenko, A. V. (2020). Biogeochemical assessment of soils and plants in industrial, residential and recreational areas of Saint Petersburg. *Journal of Mining Institute*, 241, 125–130. https://doi.org/10.31897/PMI.2020.1.125
59. Alekseenko, V. A., Shvydkaya, N. V., Bech, J., Puzanov, A. V., Nastavkin, A. V. (2021). Trace element accumulation by soils and plantsin the North Caucasian geochemical province. *Journal of Mining Institute*, 247, 141–153. https://doi.org/10.31897/PMI.2021.1.15
60. 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
61. Yener, İ. (2019). Trace element analysis in some plants species by inductively coupled plasma optical emission spectrometry (ICP-OES). *Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 9(3), 1492–1502. https://doi.org/10.21597/jist.517739
62. Sutrop, U. (2001). List task and a cognitive salience index. *Field Metods*, 13(3), 263–276. https://doi.org/10.1177/1525822X0101300303
63. Schmidhuber, J. (2015). Deep learning in neural networks: An overview. *Neural Networks*, 61, 85–117. https://doi.org/10.1016/j.neunet.2014.09.003
64. Погодаев, А. К., Хабибуллина, Е. Л., Инютин, Д. М. (2021). Применение нейросетевых моделей для построения продукционных правил экспертных систем. *Прикладная математика и вопросы управления*, 2, 73–92. [Pogodaev, A. K., Khabibullina, E. L., Inyutin, D. M. (2021). Applying neural network models to the construction of production rules expert systems. *Applied Mathematics and Control Sciences*, 2, 73–92. (In Russian)] https://doi.org/10.15593/2499-9873/2021.2.05
65. Widrow, B., Greenblatt, A., Kim, Y., Park, D. (2013). The no-prop algorithm: A new learning algorithm for multilayer neural networks. *Neural Networks*, 37, 182–188. https://doi.org/10.1016/j.neunet.2012.09.020
66. Tang, D., Chen, M., Huang, X., Zhang, G., Zeng, L., Zhang, G. et al. (2023). SRplot: A free online platform for data visualization and graphing. *PLoS One*, 18(11), Article e0294236. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0294236
67. Vera-Maldonado, P., Aquea, F., Reyes-Díaz, M., Cárcamo-Fincheira, P., Soto-Cerda, B., Nunes-Nesi, A. et al. (2024). Role of boron and its interaction with other elements in plants. *Frontiers in Plant Science*, 15, Article 1332459. https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1332459
68. 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
69. Xu, X., Du, X., Wang, F., Sha, J., Chen, Q., Tian. G. at al. (2020). Effects of potassium levels on plant growth, accumulation and distribution of carbon, and nitrate metabolism in apple dwarf rootstock seedlings. *Frontiers in Plant Science*, 11, Article 904. https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00904
70. Prajapati, K., Modi, H. A. (2012). The importance of potassium in plant growth–a review. *Indian Journal of Plant Sciences*, 2–3,177–186.
71. Hasanuzzaman, M., Bhuyan,-B., Nahar, K., Hossain, S., Mahmud, J. A., Hossen, S. et al. (2018). Potassium: A vital regulator of plant responses and tolerance to abiotic stresses. *Agronomy*, 8, Article 31. https://doi.org/10.3390/agronomy8030031
72. Lozek, O., Fecenko, J. (1996). Effect of foliar application of manganese, boron and sodium humate on the potato production. *Zeszyty Problemowe Postepow Nauk Rolniczych*, 434, 169–172.
73. Sharma, A., Aakash, Singh, D., Singh, V., Bhayal, D., Rajput, B. (2023). Effect of foliar application of boron, zinc and manganese on dry matter accumulation, total tuber yield and economic feasibility of potato (*Solanum Tuberosum*) Cv. Kufri Chipsona-1 under Gwalior climatic conditions. *Journal of Experimental Agriculture International*, 45(11), 253–262, https://doi.org/10.9734/jeai/2023/v45i112256
74. Rahman, M., Islam, M., Alam, M., Sharifuzzaman, S., Mian, M. (2022). Effect of foliar application of boron on the yield and quality of potato. *Bangladesh Journal of Agricultural Research*, 45(2), 125–135. https://doi.org/10.3329/bjar.v45i2.59860
75. Mehdi, K., Reza, M. M., Reza, K. A., Soheila, R. (2008). Evaluation of manganese, boron, potassium, calcium and zinc effects on yield and fruit quality of barberry (*Berberis vulgaris* L.) plants. *Horticulture Environment and Biotechnology*, 49(5), 293–297.
76. Baqir, H. A., Zeboon, N. H., Al-Behadili, A. A. J. (2019). The role and importance of amino acids within plants: A review. *Plant Archives*, 19, 1402–1410.
77. Воробьев, Н. И., Пухальский, Я. В., Свиридова, О. В., Пищик, В. Н., Панферова, Т. В., Ивахнюк, Г. К. (01–02 октября, 2020). *Фрактальная композиция количественных соотношений химических элементов в растениях.* Вклад агрофизики в решение фундаментальных задач сельскохозяйственной науки. СПб.: ФГБНУ АФИ, 2020. [Vorobyov, N. I., Pukhalsky, Ya. V., Sviridova, O. V., Pishchik, V. N., Panferova, T. V., Ivakhnyuk, G. K. (October 01–02, 2020). *Fractal composition of quantitative relations of chemical elements in plants*. Contribution of agrophysics to solving the fundamental tasks of agricultural science. Saint-Petersburg: Agrophysical Research Institute, 2020. (In Russian)]
78. Кузнецова, И. Г., Сазанова, А. Л., Сафронова, В. И., Попова, Ж. П., Соколова, Д. В., Тихомирова, Н. Ю. и др. (2018). Выделение и идентификация клубеньковых бактерий гуара *Cyamopsis tetragonoloba* (L) Taub. *Сельскохозяйственная биология*, 53(6), 1285–1293. [Kuznetsova, I. G., Sazanova, A. L., Safronova, V. I., Popova, J. P., Sokolova, D. V., Tikhomirova, N. Yu. et al. (2018). Isolation and identification of root nodule bacteria from guar *Cyamopsis tetragonoloba* (L.) Taub. *Agricultural Biology,* 53(6), 1285–1293. (In Russian)] https://doi.org/10.15389/agrobiology.2018.6.1285rus
79. Ульянич, П. С., Белимов, А. А., Кузнецова, И. Г., Сазанова, А. Л., Юзихин, О. С., Лактионов, Ю. В., и др. (2022). Эффективность азотфиксирующего симбиоза гуара (*Cyamopsis tetragonoloba*) со штаммами *Bradyrhizobium retamae* rcam 05275 и *Ensifer aridi* rcam05276 в вегетационном опыте. *Сельскохозяйственная биология*, 57(3), 555–565. [Ulianich, P. S., Belimov, A. A., Kuznetsova, I. G., Sazanova, A. L., Yuzikhin, O. S., Laktionov, Yu. V. et al. (2022). Effectiveness of nitrogen-fixing symbiosis of guar (*Cyamopsis tetragonoloba*) with strains *Bradyrhizobium retamae* rcam05275 and *Ensifer aridi* rcam05276 in pot experiment. *Agricultural Biology,* 57(3), 555–565. (In Russian)] https://doi.org/10.15389/agrobiology.2022.3.555rus



| AUTHOR INFORMATION | СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ |
|---|---|
| **Affiliation** | **Принадлежность к организации** |
| **Лоскутов Святослав Игоревич** — кандидат сельскохозяйственных наук, заведующий лабораторией промышленных биотехнологических инноваций, Всероссийский научно-исследовательский институт пищевых добавок<br>191014, Санкт-Петербург, Литейный пр., 55<br>E-mail: lislosk@mail.ru<br>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<br>55, Liteiny pr., 191014, St. Petersburg, Russia<br>E-mail: lislosk@mail.ru<br>ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8102-2900 |
| **Пухальский Ян Викторович** — научный сотрудник, лаборатория промышленных биотехнологических инноваций, Всероссийский научно-исследовательский институт пищевых добавок<br>191014, Санкт-Петербург, Литейный пр., 55<br>E-mail: puhalskyyan@gmail.com<br>ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5233-3497<br>* автор для контактов | **Yan V. Puhalsky**, Researcher, Laboratory of Industrial Biotechnological Innovations, All-Russian Research Institute for Food Additives<br>55, Liteiny pr., 191014, St. Petersburg, Russia<br>E-mail: puhalskyyan@gmail.com<br>ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5233-3497<br>* corresponding author |

| AUTHOR INFORMATION | СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ |
|---|---|
| **Affiliation** | **Принадлежность к организации** |
| **Чукаева Мария Алексеевна** — кандидат технических наук, старший научный сотрудник, лаборатория мониторинга экологической обстановки, Научный центр «Экосистема», Санкт-Петербургский горный университет Императрицы Екатерины II, 199106, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, 2<br>E-mail: chukaeva_ma@pers.spmi.ru<br>ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3643-6757 | **Maria A. Chukaeva**, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Laboratory for Monitoring the Environmental Situation, Scientific Center "Ecosystem", Saint Petersburg Mining University<br>2, 21st Line, 199106, St. Petersburg, Russia,<br>E-mail: chukaeva_ma@pers.spmi.ru<br>ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3643-6757 |
| **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<br>E-mail: nik.ivanvorobyov@yandex.ru<br>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<br>3, Podbelsky highway, 196608, Pushkin 8, Saint-Petersburg, Russia<br>E-mail: nik.ivanvorobyov@yandex.ru<br>ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8300-2287 |
| **Виноградов Зосим Сергеевич** — кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник, отдел физиологии растений, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений им. Н. И. Вавилова<br>196031 Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, 42, 44<br>E-mail: vinogradov.vir@mail.ru<br>ORCID: https://orcid.org/ 0009-0008-2978-0481 | **Zosim S. Vinogradov**, Candidate of Agricultural Sciences, Leading Researcher, Department of Plant Physiology, Federal Research Center the N. I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources<br>42, 44, Bolshaya Morskaya Str., 190031 St. Petersburg, Russia<br>E-mail: vinogradov.vir@mail.ru<br>ORCID: https://orcid.org/ 0009-0008-2978-0481 |
| **Осипов Анатолий Иванович** — доктор сельскохозяйственных наук, профессор, главный научный сотрудник, отдел моделирования адаптивных агротехнологий, Агрофизический научно-исследовательский институт<br>195220, Санкт-Петербург, Гражданский просп., 14<br>E-mail: aosipov2006@mail.ru<br>ORCID: https://orcid.org/0009-0003-3181-3792 | **Anatoly I. Osipov**, Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Chief Researcher, Department of Modeling Adaptive Agricultural Technologies, Agrophysical Research Institute<br>14, Grazhdansky Prospekt, 195220, St. Petersburg, Russia<br>E-mail: aosipov2006@mail.ru<br>ORCID: https://orcid.org/0009-0003-3181-3792 |
| **Митюков Алексей Савельевич** — доктор сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник, Лаборатории комплексных проблем лимнологии, Институт озероведения Российской академии наук — обособленное структурное подразделение Санкт-Петербургского Федерального исследовательского центра Российской академии наук<br>196105, Россия, Санкт-Петербург, ул. Севастьянова, 9<br>E-mail: mitals@yandex.ru<br>ORCID: https://orcid.org/0009-0005-6904-0419 | **Aleksey S. Mityukov**, Doctor of Agricultural Sciences, Leading Researcher, Laboratories of Complex Problems of Limnology, Institute of Limnology of the Russian Academy of Sciences<br>9, Sevast'yanova Str.,196105, St. Petersburg, Russia<br>E-mail: mitals@yandex.ru<br>ORCID: https://orcid.org/0009-0005-6904-0419 |
| **Тютюма Наталья Владимировна** — доктор сельскохозяйственных наук, член-корреспондент РАН, директор, Прикаспийский аграрный федеральный научный центр РАН<br>416251, Астраханская обл., с. Соленое Займище, квартал Северный, 8<br>E-mail: tutumanv@list.ru<br>ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6582-2628 | **Natalia V. Tyutyuma**, Doctor of Agricultural Sciences, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Director, Precaspian Agrarian Federal Scientific Center of Russian Academy of Sciences<br>8, sq. Severny, village of Saline Zaymishche, 416251, Astrakhan region, Russia<br>E-mail: tutumanv@list.ru<br>ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6582-2628 |
| **Бондаренко Анастасия Николаевна** — доктор сельскохозяйственных наук, заведующий лабораторией агротехнологий овощных культур, Прикаспийский аграрный федеральный научный центр РАН<br>416251, Астраханская обл., с. Соленое Займище, квартал Северный, 8<br>E-mail: bondarenko-a.n@mail.ru;<br>ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4816-5667 | **Anastasia N. Bondarenko**, Doctor of Agricultural Sciences, Head of the Laboratory of Agrotechnology of vegetable crops, Precaspian Agrarian Federal Scientific Center of Russian Academy of Sciences<br>8, sq. Severny, village of Saline Zaymishche, 416251, Astrakhan region, Russia<br>E-mail: bondarenko-a.n@mail.ru;<br>ORCID: https://orcid.org/ 0000-0003-4816-5667 |
| **Ситнов Вениамин Юрьевич** — директор, Всероссийский научно-исследовательский институт пищевых добавок<br>191014, Санкт-Петербург, Литейный проспект, 55<br>E-mail: v.sitnov@fncps.ru<br>ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1927-1997 | **Veniamin Yu. Sitnov**, Director, All-Russia Research Institute for Food Additives<br>55, Liteiny pr., 190000, St. Petersburg, Russia<br>E-mail: v.sitnov@fncps.ru<br>ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1927-1997 |
| **Contribution** | **Критерии авторства** |
| 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. |
| **Conflict of interest** | **Конфликт интересов** |
| The authors declare no conflict of interest. | Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. |

DOI: https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-3-450-468

Поступила 13.05.2025
Поступила после рецензирования 26.09.2025
Принята в печать 30.09.2025
© Никитина М. А., Горбунова Н. А., 2025

https://www.fsjour.com/jour
Обзорная статья
Open access

# АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Никитина М. А.*, Горбунова Н. А.
Федеральный научный центр пищевых систем им. В. М. Горбатова, Москва, Россия

*КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:*
*3D-печать, 3D-принтер, пищевая промышленность, пищевые биочернила, «напечатанные» продукты, персонифицированные продукты, реологические свойства, цели устойчивого развития (ЦУР)*

АННОТАЦИЯ
3D-печать, также известная как аддитивное производство, представляет собой технологию, которая используется для изготовления объектов с помощью послойной печати на основе цифровых моделей. Она применяется в пищевой промышленности для персонализации питания, оптимизации цепочек поставок и расширения ассортимента доступных продуктов. Кроме того, показано, что эта технология помогает решать глобальные задачи, включая сокращение пищевых отходов за счет оптимизации технологических процессов и рационального использования сырья, в том числе через включение восстановленных питательных веществ из побочных продуктов агропромышленного производства в печатные продукты питания. В статье рассмотрены сильные стороны и риски применения аддитивных технологий, ключевые тренды и особенности их применения в пищевой промышленности, а также современное состояние мирового рынка 3D-технологий. Проанализированы возможности 3D-печати различных видов продуктов на основе последних научных разработок, рассмотрены проблемы печати мясных продуктов и их аналогов, а также перспективы использования 3D-печати для персонализации питания с учетом требований и предпочтений потребителей. В статье оценили препятствия для выхода пищевых 3D-принтеров и технологий на потребительский рынок. Проанализированы свойства исходных материалов (пищевые чернила), оказывающих значительное влияние на пищевые продукты, напечатанные на 3D-принтере, особенно на их механическую прочность и вязкость, которые влияют на точность и формуемость напечатанных продуктов. Показано, что метод смешивания функциональных компонентов и материалов для печати имеет высокий потенциал для индивидуальной настройки функциональных продуктов питания под потребности разных групп потребителей. Кроме того, в данной работе обобщены методы оценки эффективности 3D-печати пищевых продуктов и определено влияние 3D-печати на достижение «Целей устойчивого развития».

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Статья подготовлена в рамках выполнения исследований по государственному заданию НИР № FGUS-2024-0003 Федерального научного центра пищевых систем им. В. М. Горбатова РАН.

Received 13.05.2025
Accepted in revised 26.09.2025
Accepted for publication 30.09.2025
© Nikitina M. A., Gorbunova N. A., 2025

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

# ADDITIVE MANUFACTURING IN THE FOOD INDUSTRY

Marina A. Nikitina*, Nataliya A. Gorbunova
V. M. Gorbatov Federal Research Center for Food Systems, Moscow, Russia

*KEY WORDS:*
*3D-printing, 3D-printer, food industry, food bio-ink, "printed" products, personified products, rheological properties, Sustainable Development Goals (SDGs)*

ABSTRACT
3D-printing, also known as additive manufacturing, is a technology that is used to produce objects through the layer-by-layer printing process based on digital models. It is employed in the food industry to personify nutrition, optimize the supply chains and extend a range of available products. Moreover, it has been shown that this technology helps solve global tasks including a reduction of food waste due to the optimization of technological processes and rational use of raw materials, including by introducing recovered nutritional substances from by-products of agro-industrial production into printed food products. The paper examines advantages and risks of additive manufacturing, key trends and peculiarities of their use in the food industry, as well as the current state of the world market of 3D technologies. Possibilities of 3D printing of various types of products based on the latest scientific developments are analyzed, problems of printing meat products and their analogs are examined, and prospects of using 3D printing to personify nutrition with account for consumers' requirements and preferences are discussed. Obstacles for launching 3D food printers and technologies on the consumer market were assessed. The authors analyzed properties of initial materials (food inks) that exert a significant impact on food products printed on a 3D printer, especially their mechanical strength and viscosity, which affect accuracy and formability of printed products. It has been shown that the method of mixing functional components and materials for printing has a high potential for tailoring functional foods according to needs of various consumer groups. Furthermore, methods for assessment of the efficiency of 3D food printing are summarized and an effect of 3D printing on achieving Sustainable Development Goals is determined.

FUNDING: The article was published as part of the research topic No. No FGUS-2024–0003 of the state assignment of the V. M. Gorbatov Federal Research Center for Food Systems of RAS.

## 1. Введение

Пищевая промышленность переживает смену парадигмы своего функционирования и развития. Растущая осведомленность потребителей о составе пищи и интерес к персонализированным сенсорным ощущениям стимулируют разработку технологий, способных удовлетворить новые потребительские запросы [1]. При этом необходимо учитывать, что в дополнение к последствиям изменения климата существует проблема скорости использования природных ресурсов по сравнению с темпами их восполнения, известная как «глобальный след». Считается, что для поддержания нынешних потребностей человечеству требуется в 1,8 раза больше ресурсов, чем доступно на Земле. Поэтому необходимо развивать альтернативные технологии производства продовольствия, а не полагаться исключительно на традиционные методы [2].

Одной из таких технологий является 3D-печать, впервые использованная для производства пищевых продуктов в 2007 году. С тех

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: **Никитина, М. А., Горбунова, Н. А.** (2025). Аддитивные технологии в пищевой промышленности. *Пищевые системы*, 8(3), 450–468. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-3-450-468

FOR CITATION: **Nikitina, M. A., Gorbunova, N. A.** (2025). Additive manufacturing in the food industry. *Food Systems*, 8(3), 450–468. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-3-450-468

пор 3D-печать используется для создания визуально сложных геометрических структур, выходящих за рамки возможностей традиционных методов производства продуктов питания. В последнее время акцент сместился с визуальных аспектов продуктов на контроль и персонализацию пищевых характеристик продуктов. Продукты должны быть не только визуально привлекательными, но и обладать здоровым питательным профилем [1].

Согласно словарю Merriam-Webster [3], 3D-печать — это «изготовление твердых объектов путем нанесения слоев материалов в соответствии со спецификациями, которые хранятся и отображаются в электронном виде в виде цифровой модели».

3D-печать также обозначается другими терминами, такими как аддитивное производство слоев (ALM), твердотельное производство произвольной формы (SFF) и быстрое прототипирование (RP). В настоящее время термин «3D-печать» используется как обобщающее обозначение этой технологии [1].

Аддитивное производство как более широкий термин, включающий в себя и технологию 3D-печати, охватывает различные технологии, которые создают объекты путем добавления материала слой за слоем. При производстве продуктов питания аддитивные технологии включают в себя создание съедобных биообъектов путем постепенного наложения слоев различных пищевых материалов. Такой подход позволяет индивидуализировать питание, оптимизировать управление пищевыми процессами и повысить эффективность производства продуктов, обеспечивая преимущества, такие как оптимизация цепочки поставок, индивидуальное формование продукта, персонализация питания и расширение ассортимента доступных источников (ингредиентов) пищи [4]. Разнообразные области применения 3D-печати продуктов питания оказывают благотворное влияние на социальные, экологические и экономические факторы, способствуя достижению целей в области устойчивого развития [5].

Аддитивное производство в пищевой промышленности сочетает в себе междисциплинарное взаимодействие в области кулинарного искусства, пищевой инженерии и материаловедения [6].

3D-технологии являются движущей силой крупных инноваций в пищевой промышленности, так как аддитивные технологии в пищевом секторе имеют большой потенциал для создания 3D-конструкций со сложной геометрией, тщательно продуманными текстурами и индивидуальным содержанием питательных веществ [7].

Цель данного обзора — анализ и систематизация исследований современного состояния технологии 3D-печати продуктов питания, а также оценка ее потенциальных областей применения, рисков, ограничений и преимуществ при разработке пищевых продуктов. Кроме того, рассматривается влияние 3D-печати на пищевую промышленность в контексте достижения целей устойчивого развития (ЦУР), реализуемых в настоящее время.

## 2. Материалы и методы

В данном исследовании был проведен интегративный обзор научно-технической литературы с использованием баз данных Google Scholar, Science Direct, PubMed, eLibrary, выполненный по алгоритму, представленному на Рисунке 1. Он направлен на анализ и обобщение современных технологий 3D-печати, применяемых для создания пищевых продуктов. Кроме того, проведен анализ материалов, представленных на сайтах компаний-производителей 3D-принтеров.

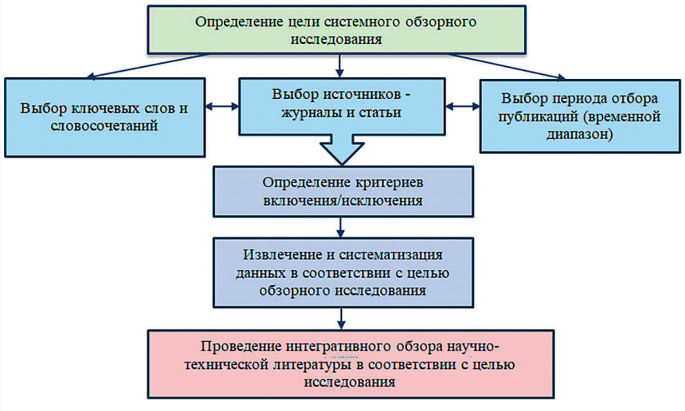



Рисунок 1. **Алгоритм интегративного обзора научно-технической литературы**

Figure 1. **Algorithm of the integrative review of scientific-technical literature**

Поиск был осуществлен по ключевым словам, связанным с такими аспектами, как 3D-печать продуктов питания, аддитивное производство, пищевые материалы для 3D-печати, требования к пищевым чернилам, кастомизация продуктов питания и применение 3D-технологий для достижения ЦУР. Рецензирование, проведенное двумя авторами для минимизации предвзятости, включало определение критериев включения и исключения, а также извлечение данных.

Критерии включения статей в системный обзор:

- области применения 3D-печати пищевых продуктов;
- классификация технологий 3D-печати в зависимости от принципов их работы;
- технология 3D-печати в области кастомизации и разработки продуктов питания;
- принтеры, параметры, материалы для 3D-печати пищевых продуктов;
- свойства пищевых чернил и требования к ним;
- проблемы, барьеры и риски, которые необходимо преодолеть в процессе 3D-печати пищевых продуктов;
- использование 3D-технологий для достижения ЦУР.

Критерии исключения:

- цифровые продукты питания и молекулярная гастрономия;
- оценка культуры питания, связанной с аддитивными технологиями;
- клинические исследования продуктов, полученных с использованием 3D-печати;
- эстетические аспекты производства продуктов, полученных с использованием 3D-печати;
- постобработка продуктов, полученных с использованием 3D-печати;
- подходы к 3D-печати для интеллектуальной упаковки пищевых продуктов.

Теоретической и методической основой исследования являлись систематизированные данные, представленные в научных статьях, опубликованных на английском и русском языках с января 2014 по март 2025 гг., которые дают полное представление о последних достижениях и о текущем состоянии 3D-печати в пищевой промышленности.

Отобранные статьи были тщательно проанализированы, чтобы понять интерактивные факторы, необходимые для рационального выбора методов 3D-печати в дизайне пищевых продуктов, а именно их пригодность для печати, применимость и возможность последующей обработки. Первоначальный поиск выявил 478 статей, из которых 58 повторяющихся статей были удалены, 142 статьи были исключены из-за проблем с поиском, а 117 статей были исключены после проверки названия и аннотации на предмет несоответствия критериям включения. Были проанализированы полные тексты 161 статьи, отобранной по критериям высокого качества и соответствия теме, направленной на достижение цели исследования. В итоге для методической проверки были отобраны 115 статей, а также 5 патентов. Таким образом, данная методическая оценка предлагает подробное изучение технологий 3D-печати пищевых продуктов и их применения, обеспечивая тщательный и непредвзятый процесс анализа, позволяющий выделить важные исследования и разработки в этой области.

## 3. Современное состояние мирового рынка 3D-технологий

### *3.1. Развитие мирового рынка 3D-печати продуктов питания*

Эксперты прогнозируют, что мировое производство полностью готовых продуктов питания с помощью 3D-печати значительно вырастет в ближайшие годы, увеличившись с $6422,5 млн в 2019 году до $44520 млн к 2026 году. Согласно исследованиям, пищевой сектор может извлечь выгоду из 3D-печати за счет использования автоматизированных пищевых машин и прогнозной аналитики для повышения эффективности, производительности и экономичности [8].

Мировой рынок 3D-печати продуктов питания в 2021 году оценивался в 165,5 млн долларов США, и ожидается, что в течение прогнозируемого периода 2022–2030 г. (Рисунок 2) он будет расти в среднем на 57,3 % [9].

Основная часть компаний, занимающихся исследованиями и разработками в области 3DP, сосредоточена в США и странах Евросоюза, на их долю приходится 65,6 % мирового рынка (37,8 и 27,8 % соответственно), затем следуют КНР (9,7 %) и Япония (9,3 %).

Аналитики компании Emergen Research считают, что мировой рынок пищевых технологий достигнет к 2027 году $342,52 млрд. 3D-печать принесет производителям новые возможности, так как с ее помощью можно будет создавать новые вкусы и блюда без построения сложных производственных линий.

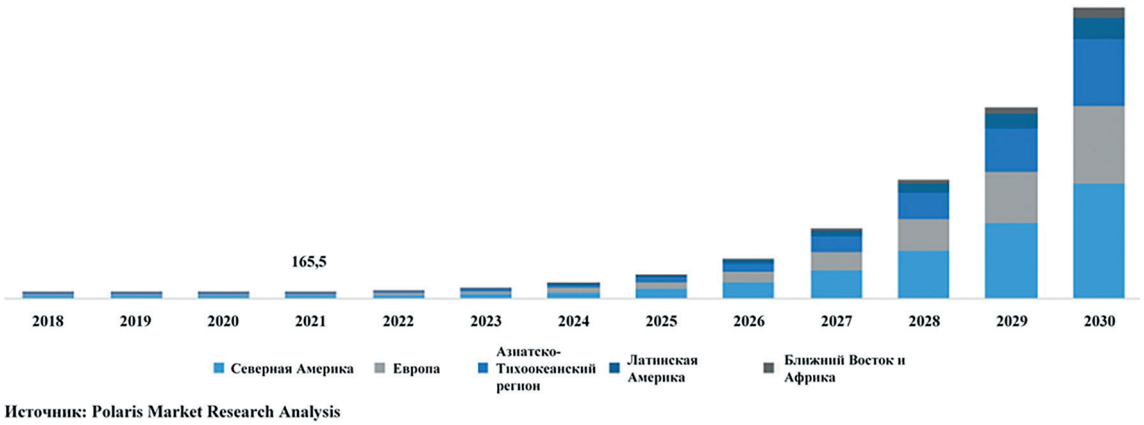



Рисунок 2. **Динамика развития мирового рынка 3D-печати продуктов питания [9]**
Figure 2. **Dynamics of the development of the world market of 3D food printing [9]**

Целый ряд международных корпораций уже используют эту технологию при производстве своей продукции, например, Hershey's (шоколад), Barilla (макароны), Ruffles (картофельные чипсы), Oreo (печенье) и Mazola (фрукты и овощи). При производстве мясных продуктов Aleph Farms и Meatech используют 3D-печать для производства мяса, выращенного в лаборатории, а Redefine Meat и Novameat — для мяса на растительной основе [1].

В России наблюдается значительное отставание промышленного использования 3D-печати по сравнению с развитыми странами. В нашей стране используется всего 1,5% аддитивного оборудования, существующего в мире. Анализ информации показывает, что в России пищевая 3D-печать применяется в основном для декорирования кондитерских изделий по заказу, при этом оборудование по большей части поставляется из Китая. Расходные материалы — это сахарная и вафельная бумага, шоколадная паста и листы, пищевой пластик, съедобные чернила. Использование этих материалов позволяет создавать уникальные пищевые продукты, отвечающие интересам клиентов к инновационным и персонализированным решениям в питании. По мнению специалистов, аддитивные технологии обладают значительным потенциалом для применения в лечебных и оздоровительных целях. Массового внедрения аддитивных технологий в России как альтернативного способа приготовления пищи пока не происходит, поскольку оно требует значительных финансовых вложений и сдерживается традициями и менталитетом россиян [10].

*3.2. Рынок пищевых 3D-принтеров*

3D-принтеры (3DP) уже стали активно использоваться на предприятиях пищевой промышленности и общественного питания (например, в ресторанах).

Рынок пищевых 3D-принтеров находится в стадии роста. Существует два основных вида 3D-принтеров: карусельного и экструзионного типа. Они различаются по принципу работы и конструкции.

1. Экструзионные 3D-принтеры.

Принцип работы: слой за слоем выдавливает съедобную массу на рабочую поверхность, может формировать полноценное блюдо или продукт.

Структура: обычно имеют статичную платформу и движущуюся печатающую головку, которая перемещается по осям X, Y и Z.

Преимущества: простота в использовании, доступность материалов, широкая распространенность.

Недостатки: ограниченная скорость печати, качество поверхности может варьироваться.

2. Карусельные 3D-принтеры

Принцип работы: эти принтеры используют вращающуюся платформу (карусель), на которой размещаются печатаемые объекты. Печать происходит за счет того, что объект вращается, а печатающая головка может двигаться вверх и вниз или вбок, создавая слои. Из вращающейся емкости с сырьем выбирается нужный ингредиент и выдавливается указанная в рецептуре дозировка (объем, массовая доля). В базе пищевого 3D-принтера карусельного типа может храниться практически неограниченное количество рецептур пищевых продуктов.

Структура: обычно имеют более сложную конструкцию с вращающейся платформой и фиксированной печатающей головкой.

Преимущества: возможность печати нескольких объектов одновременно, потенциально более высокая скорость печати для больших объектов.

Недостатки: более сложная конструкция может увеличить стоимость и потребовать более точной настройки.

В 2012 году компания Essential Dynamics[1] представила принтер Imagine 3D, который осуществляет печать различными материалами: шоколадом, сыром, силиконом, эпоксидной смолой и бетоном. Он мог быть использован в различных отраслях — от кулинарного искусства до строительства и образования. Цена принтера Imagine 3D составляла 3000 долларов.

Первый мясной продукт (небольшие лоскуты мяса размером примерно 2 см в длину, 1 см в ширину и толщиной 1 мм), напечатанный на 3D-принтере, был представлен в 2013 году компанией Modern Meadow[2]. Они продемонстрировали технологию биопринтинга, которая позволяла создавать мясные структуры, используя животные клетки (мышцы, жировые клетки, а также клетки других типов).

В 2016 году NASA запустило 3DP (The Zero-Gravity) для создания готовых 3D-форм в космосе. Наличие 3DP стало существенным улучшением условий пребывания на МКС. Астронавты самостоятельно могут печатать необходимые инструменты и предметы, не дожидаясь доставки необходимых объектов с Земли.

Британская компания Cadbury[3] впервые использовала свой первый 3D-принтер — Cadbury Dairy Milk — для производства молочного шоколада в Мельбурне в 2019 году. Компания использует 3D-печать для изготовления пресс-форм и прототипов новых кондитерский изделий.

Итальянская компания Barilla[4] совместно с голландским исследовательским институтом TNO (Netherlands Organisation for Applied Scientific Research, Нидерландская организация прикладных научных исследований) в 2016 году представила свой первый пищевой 3D-принтер, способный создавать свежую пасту. При помощи воды и манной муки, перемолотой из твердой пшеницы, машина может печатать пасту любой формы. В 2024 году Barilla запустила производство кастомизированных 3D-печатных макаронных изделий через компанию BluRhapsody[5]. Технология применяется для создания форм пасты, соответствующих индивидуальным предпочтениям клиентов, включая уникальные дизайны, отражающие природные или сезонные особенности. На сайте представлен широкий ассортимент форм, включая фигуры в виде бабочек, сердец, сфер, ракушек и морских ежей.

Немецкая компания Biozoon Food Innovations[6] с 2014 года применяет технологию 3D-печати для создания блюд, адаптированных для

[1] Essential Dynamics Imagine 3D Printer. Retrieved from https://essentialdynamics.net. Accessed February 20, 2025.
[2] Modern Meadow. Retrieved from https://modernmeadow.com. Accessed February 20, 2025.
[3] Cadbury Dairy Milk. Retrieved from https://mondelezinternational.com. Accessed February 20, 2025.
[4] Barilla. Retrieved from http://www.barillagroup.com. Accessed February 20, 2025.
[5] Artisia by Barilla (2025). Finger food 3D pasta for glamorous aperitifs. Retrieved from http://blurhapsody.com. Accessed February 20, 2025.
[6] Biozoon Food Innovations. Retrieved from https://biozoon.de/en/ Accessed February 20, 2025.

пожилых людей. 3D-принтер, оснащенный 48 соплами, смешивает пюре из продуктов, таких как спаржа, цыпленок, свинина, горох, макароны и картофель, с веществом, состав которого компания Biozoon не раскрывает. Этот ингредиент обеспечивает сохранение формы пюре и его легкое растворение при употреблении.

В 2014 году британская дизайнерская студия Dovetailed[7] представила свой пищевой 3D Fruit Printer на хакатоне Tech Food Hack в Кембридже. Совместно с Microsoft они разработали фруктовый 3D-принтер, работающий на базе технологии молекулярной гастрономии (сферификация). 3D-принтер может напечатать фрукт любой формы и размера. Технология заключается в соединении отдельных капель жидкости с разными ароматизаторами.

В 2015 году компания 3D Bioprinting Solutions[8] совместно с сетью ресторанов быстрого питания KFC начала разработку инновационной технологии для создания куриного мяса с использованием 3D-биопринтера. В 2018 году компания запустила магнитный биопринтер, а в сентябре 2020 фудпринтер от 3D Bioprinting Solutions был представлен в ресторане Twins Garden. На фудпринтере был напечатан кальмар из растительного белка.

В 2018 году Novameat[9] стала первой компанией в мире, которая напечатала на 3D-принтере стейк из говядины без мяса.

В настоящее время существуют следующие направления использования 3D-принтеров:

- для печати шоколадом объемных фигур, плоских изображений и надписей:
  1) 3D-принтер Choc Edge Choc Creator 2.0 Plus[10]. Характеристики 3D-печати: а) область печати: 180 × 180 × 50 мм; б) толщина слоя: 0,8 мм; в) скорость печати: 150 мм/с. Для пользователей разработаны мобильные приложения: Choc Draw, Mix & Match и Choc Text, с их помощью можно создавать свои рисунки и надписи.
  2) 3D-принтер Chocola3d[11]. Характеристики 3D-печати: а) область печати: 250 × 210 × 80 мм; б) толщина слоя: 0,1 мм; в) скорость печати: 50 мм/с.
     Данный 3D-принтер может печатать не только шоколадными чернилами, но и кондитерскими смесями, мягкими сырами, паштетом и другими пастообразными ингредиентами-чернилами.
  3) 3D-принтер Rokit Chocosketch[12]. Характеристики 3D-печати: а) область печати: 240 × 120 × 70 мм; б) толщина слоя: 0,3 мм; в) скорость печати: 20 мм/с. Пользователи могут скачать 3D-модели на сайте производителя или загрузить их с SD-карты.
- для печати сахаром:
  1) 3D-принтер ChefJet Pro Food[13]. Характеристики 3D-печати: а) область печати: 203 × 203 × 152 мм; б) толщина слоя: 1 мм; в) скорость печати: 0,014 мм/с.
     Настольная модель принтера ChefJet печатает монохромные изделия, а более крупный аппарат ChefJet Pro — цветные объекты с различными вкусами: шоколадным, ванильным, мятным, вишневым, яблочным и так далее.
     В ресторане Melisse в Санта-Монике 3D-принтер ChefJet Pro применяется для изготовления гренок с индивидуальными формами, предназначенных для подачи с луковым супом.
     Компания The Sugar Lab[14] в Лос-Анджелесе, первая в мире цифровая пекарня, использует 3D-печать для создания украшений для свадебных тортов. Дизайнеры разрабатывают модели, которые затем изготавливаются на 3D-принтерах.
- для печати блинов и оладий:
  1) 3D-принтер PancakeBot[15]. Характеристики 3D-печати: а) область печати: 430 × 210 мм; б) скорость печати: регулируемая.
     3D-принтер PancakeBot позволяет создавать блины с индивидуальными формами, включая сложные и декоративные дизайны. Пользователь может загрузить дизайны блинов через SD-карту или разработать свой дизайн с использованием программного обеспечения, идущего в комплекте.
  2) Принтер ZBOT Commercial Art Pancakes Printer F5[16]. Характеристики 3D-печати: а) область печати: 180 × 180 × 15 мм; б) толщина слоя: 0,4 мм; в) скорость печати: 300 мм/с.
  3) 3D-принтер Commercial Art Pancakes Printer F5 предназначен для создания блинов с индивидуальными узорами и надписями.
- для нанесения рисунков и надписей на пенку напитков, таких как кофе или капучино:
  1) Cafe maker. Характеристики 3D-печати: а) область печати: 110 × 110 мм; б) скорость печати: 10 с/чашка.
     3D-принтер Cafe maker предназначен для нанесения изображений как монохромных, так и цветных. Он позволяет печатать 3 цветами — синим, красным и желтым. В приложении CupShow можно выбрать имеющиеся изображения и напечатать собственные фотографии.
  2) Принтер Ripple Maker. Характеристики 3D-печати: а) область печати: 110 × 110 мм; б) скорость печати: 10 с/чашка.
     3D-принтер Ripple Maker за несколько секунд перенесет изображение, надпись или рисунок на поверхность кофейной или пивной пенки (пены). В приложении Barista есть большая библиотека готовых изображений.
- для 3D-печати пастообразных пищевых материалов, таких как пюре из манго, шпината, авокадо и других ингредиентов, позволяющих создавать изделия сложной формы и дизайна.
  1) Принтер Foodini[17]. Характеристики 3D-печати: а) область печати: 250 × 165 × 120 мм; б) толщина слоя: 0,1 мм; в) скорость печати: 100 мм/с.
     Foodini — универсальный пищевой 3D-принтер, изготовленный испанской фирмой Natural Machines для упрощения рутинных процессов при приготовлении пищи. Он может печатать пельмени, пасту, печенье, съедобные элементы декора и даже гамбургеры. В 3D-принтер можно одновременно загружать до пяти различных ингредиентов. Аппарат поставляется с соплами разного диаметра, поэтому для печати подходит пища различной текстуры.
     Принтер Foodini используют в ресторане La Enoteca в Барселоне для печати изображения в виде коралла чернилами-пюре из морепродуктов для блюда Sea Coral.
  2) Принтер byFlow Focus[18]. Характеристики 3D-печати: а) область печати: 208 × 228 × 150 мм; б) толщина слоя: 0,1–0,4 мм; в) скорость печати: 60 мм/с.
     В ресторане Food Ink принтер byFlow Focus применяется для создания блюд и элементов сервировки с использованием технологии 3D-печати. Это иммерсивное футуристическое пространство представляет концептуальную серию ужинов, где кухня сочетается с искусством, философией и передовыми технологиями.
     3D-принтер byFlow Focus также используют в испанском ресторане La Boscana для создания различных блюд, таких как мясо в шампанском, карпаччо с соусом гуакамоле, 3D-сыр.

Таким образом, 3D-принтеры демонстрируют универсальность в создании разнообразных пищевых продуктов, включая мясные, молочные и декоративные элементы.

Компания Steakholder Foods[19], основанная в 2019 году, специализируется на разработке и продаже производственных машин для 3D-печати (MX200 для мяса и HD144 для рыбы), работающих на основе запатентованных премиксов из высококачественного сырья. Эти инновационные устройства позволяют производителям любого масштаба эффективно создавать пищевые продукты, соответствующие ожиданиям потребителей по вкусу, текстуре и внешнему виду, а также предоставляют безопасную и экологически устойчивую альтернативу традиционному производству мяса и морепродуктов.

В ноябре 2024 года UMAMI Bioworks[20], ведущий мировой поставщик платформ для культивирования морепродуктов, и Steakholder Foods[19], ведущий новатор в области альтернативных белков и технологий 3D-печати, объявили о кульминации двухлетнего сотрудничества в области исследований и разработок, финансируемого SIIRD (грантом Сингапура и Израиля на промышленные исследования и разработки). Партнерство заложило основу для производства культивированного рыбного филе премиум-класса с использованием

[7] Dovetailed. Retrieved from https://www.dovetailed.co. Accessed February 20, 2025.
[8] 3D Bioprinting Solutions. Retrieved from https://www.bioprinting.ru Accessed February 20, 2025.
[9] Novameat. Retrieved from https://novameat.com Accessed February 20, 2025.
[10] Choc Edge Ltd. Retrieved from https://www.chocedge.com Accessed February 20, 2025.
[11] Chocola3d. Retrieved from http://chocola3d.com Accessed February 20, 2025.
[12] Rokit. 3Dison Chocosketch. Retrieved from http://en.3disonprinter.com Accessed February 20, 2025.
[13] 3D Systems. ChefJet Pro Food. Retrieved from https://3dsystems.com Accessed February 20, 2025.
[14] 14The Sugar Lab. Retrieved from https://sugarlab3d.com Accessed February 20, 2025.
[15] PancakeBot. Retrieved from https://pancakebot.com. Accessed February 20, 2025.
[16] ZBOT. Commercial Art Pancakes Printer F5. Retrieved from https://www.zbot.cc. Accessed February 20, 2025.
[17] Natural Machines. Foodini. Retrieved from https://www.naturalmachines.com/how-it-works. Accessed February 20, 2025.
[18] Food Ink. The world's first 3D-printing restauraunt. Retrieved from https://foodink.io. Accessed February 20, 2025.
[19] Steakholder Foods. 3D Printing the future of Food. Retrieved from https://steakholderfoods.com Accessed February 20, 2025.
[20] UMAMI Bioworks. Retrieved from https://www.umamibioworks.com. Accessed February 20, 2025.

технологии 3D-печати, что стало значительным шагом на пути к устойчивой коммерциализации морепродуктов.

3D-печать рыбного продукта сложнее, чем печать говяжьего стейка, из-за волокнистой текстуры. Разработанный алгоритм позволяет воспроизводить слоистую структуру рыбы.

Другой израильский стартап от компании Plantish Salmon™[21] — технология 3D-печати растительного филе лосося из белков бобовых и экстракта водорослей. Филе лосося, полностью изготовленное из растительных материалов с использованием 3D-печати, воспроизводит текстуру, вкус и внешний вид приготовленного натурального лосося. Цель компании — разработать универсальную запатентованную технологию аддитивного производства, которая позволит производить растительные альтернативы рыбе по низкой цене и в больших масштабах.

3D-биопечать является многообещающим направлением для повышения качества и выхода продукции, снижения производственных затрат и повышения экологической устойчивости культивируемого мяса. Это позволяет удовлетворять растущий спрос на мясо за счет экологически устойчивых методов производства.

Несмотря на вышесказанное, в июне 2024 года американский производитель лабораторного мяса методом 3D-печати SciFi Foods прекратил деятельность, не реализовав ни одной порции продукции. Основатели планировали выпускать котлеты для бургеров из смеси растительных ингредиентов и культивируемых клеток крупного рогатого скота в пропорции 90:10. Инвестиции, вложенные в проект, составили 40 млн долларов.

Американская биотехнологическая компания Finless Foods, специализирующаяся на выращивании рыбы, в частности голубого тунца, сократила штат сотрудников, т. к. инвестиции в стартапы по выращиванию искусственного мяса в 2022–2023 гг. сократились на 75 %.

## 4. Технологии 3D-печати пищевых продуктов, их характеристика и классификация

Аддитивные технологии — методы производства, при которых объекты создаются путем последовательного добавления материалов. В отличие от традиционных методов, таких как фрезерование или литье, которые предполагают удаление материала из заготовки, аддитивные технологии формируют изделия слой за слоем. Основоположником аддитивных технологий считается американский изобретатель Чак Халл (Chuck Hull). В 1983 году он разработал метод стереолитографии (Stereolithography, SLA). Халл создал первый 3D-принтер, который использовал ультрафиолетовое световое излучение для полимеризации жидкой смолы, слой за слоем формируя трехмерные объекты. В 1986 году ученый получил патент на свою технологию [11], что стало отправной точкой для дальнейшего развития аддитивных технологий.

В последующие годы появились и другие методы:

1) селективное лазерное спекание (SLS, Selective Laser Sintering). Технология аддитивного производства, позволяющая выращивать модели из полимерных порошков, спекая их лучом лазера. Разработано в середине 1980-х годов доктором Карлом Декардом (Carl Deckard) и научным руководителем доктором Джо Биманом (Joe Beaman) в Техасском университете в Остине при спонсорской поддержке DARPA [12].
2) производство ламинированных объектов (LOM, Laminated object manufacturing). Способ формирования цельного изделия из ламинатов (LOM) подразумевает поэтапное склеивание листов бумаги, пластика или металлической фольги с последующим формированием контура при помощи лазерной резки. Данный метод предложил в 1987 году Михаэль Фейген (Michael Feygin) [13].
3) моделирование методом наплавления (FDM, Fused Deposition Modeling). Технология заключается в создании объектов за счет нанесения последовательных слоев материала, повторяющих контуры цифровой модели. Как правило, в качестве материалов для печати выступают термопластики, поставляемые в виде катушек нитей или прутков. Разработано в 1988 году С. Скоттом Крампом (S. Scott Crump), соучредителем компании Stratasys [14].
4) струйная трехмерная печать (3D printing, 3DP). Принцип работы заключается в послойном построении физических объектов на основе цифровой трехмерной модели. Осуществляется впрыскиванием связующего порошкового материала на выбранные области слоя с получением связанного композита, соответствующего поперечному сечению трехмерной модели. Технология была разработана в Массачусетском технологическом институте (Massachusetts Institute of Technology, MIT) в 1989 году и запатентована в 1993 [15,16].

Таким образом, временной отрезок с 1980 по 1990 годы можно считать наиболее важным в истории развития аддитивных технологий, в частности 3D-печати. В этот период времени были разработаны основные технологии: SLA (Stereolithography), SLS (Selective Laser Sintering), LOM (Laminated object manufacturing), FDM (Fused Deposition Modeling), 3DP (3D printing).

Основные характеристики аддитивных технологий:

1. Слой за слоем: процесс начинается с цифровой модели, которая разбивается на слои. Затем материал добавляется по одному слою, пока не будет создано полное изделие.
2. Разнообразие материалов: аддитивные технологии могут использовать различные материалы, включая пластики, металлы, керамику и даже биологические материалы.
3. Гибкость дизайна: технологии позволяют создавать сложные геометрические формы и структуры, которые трудно или невозможно произвести с помощью традиционных методов.
4. Экономия материалов: поскольку материал добавляется только в тех местах, где это необходимо, отходы производства могут быть значительно снижены.

В настоящее время не существует устоявшейся классификации аддитивных технологий. Первый документ о систематизации терминов, определений и базовых понятий принадлежит американскому обществу по материалам и их испытаниям American Society for Testing and Materials (ASTM). В 2012 году ASTM создало стандарт ASTM F2792-12A[22]. В соответствии с данным стандартом выделяют семь видов аддитивных технологий:

**binder jetting** — «разбрызгивание связующего» (порошковые материалы соединяются выборочным нанесением жидкого связующего);

**directed energy deposition** — «прямой подвод энергии в место построения» (энергия от внешнего источника используется для соединения материалов путем их сплавления в процессе нанесения);

**material extrusion** — «экструзия/выдавливание материала» (материал выборочно подается через сопло или отверстие (жиклер);

**material jetting** — «разбрызгивание материала» (послойное струйное нанесение основного вещества);

**powder bed fusion** — «сплавление в слое порошкового материала» (энергия от внешнего источника используется для избирательного спекания/сплавления предварительно нанесенного слоя порошкового материала);

**sheet lamination** — «листовое наплавление/ламинирование» (изготовление детали осуществляется послойным соединением листовых материалов);

**vat photopolymerization** — «фотополимеризация в ванне» (жидкий фотополимер выборочно отверждается (полимеризуется) в ванне световым излучением).

Деление основывалось на способе подвода тепла, на методе фиксации слоя и на форме используемого материала.

В 2015 году стандарт ASTM F2792-12A[22] был пересмотрен. ASTM совместно с Международной организацией по стандартизации (ISO) разработали международный стандарт ISO/ASTM 52900:2015[23]. В 2021 году вышла новая версия данного стандарта ISO/ASTM 52900:2021[24]. В этом документе установлены и определены термины, используемые в технологии аддитивного производства, которая применяет принцип аддитивного формования и тем самым создает физическую трехмерную (3D) геометрию путем последовательного добавления материала. Термины были классифицированы по конкретным областям применения.

Российский ГОСТ Р 57558-2017[25] был разработан на основе ISO/ASTM 52900:2015[23].

На Рисунке 3 представлена классификация 3D-печати по типу используемых материалов, принципу работы, степени автоматизации, области применения и толщине слоя.

С момента появления первых аддитивных технологий, включая 3D-печать, достигнут значительный прогресс: улучшено качество печати с использованием различных материалов, существенно снижена стоимость продукции и оборудования, а также расширен спектр применения, охватывающий медицину, авиакосмическую отрасль, пищевую промышленность и другие области. На Рисунке 4 представлены главные этапы развития аддитивных технологий.

[21] Plantish Salmon™. Retrieved from https://www.plantish.com. Accessed February 20, 2025.

[22] ASTM F2792–12A (American Society for Testing and Materials). Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies. 2012.

[23] ISO/ASTM 52900:2015 (Additive manufacturing — General principles — Terminology). 2015.

[24] ISO/ASTM 52900:2021 (Additive manufacturing — General principles — Terminology). 2021.

[25] ГОСТ Р 57558-2017/ISO/ASTM 52900:2015. Аддитивные технологические процессы. Базовые принципы. Часть 1. Термины и определения. Москва: Стандартинформ, 2018.




Рисунок 3. **Классификация 3D-печати**
Figure 3. **Classification of 3D printing**




Рисунок 4. **Вехи развития аддитивных технологий**
Figure 4. **Milestones in the development of additive manufacturing**

## 5. Особенности 3D-технологий производства пищевых продуктов

*5.1. Требования к пищевым биочернилам для 3D-печати продуктов*

Пригодность для печати является ключевым/критически важным параметром в технологии 3D-печати и, по сути, определяет способность пищевого материала печататься и сохранять свою форму.

Несмотря на многочисленные преимущества, технология 3D-печати пищевых продуктов связана с рядом сложностей, включая обеспечение стабильного качества и точности при печати биоматериалов. Wilson и соавторы [17] отмечают, что на производительность 3D-печати и качественные характеристики печатных изделий (объектов) влияют свойства пищевых чернил и параметры печати [18,19].

Для успешной 3D-печати пищевые чернила должны обладать определенными реологическими свойствами, обеспечивающими текучесть для экструзии, стабильность для сохранения формы и пластичность для создания сложных структур [19,20]. При этом необходимо поддерживать баланс этих свойств, сохраняя пищевую ценность и органолептические качества продукта [21,22]. То есть для обеспечения пригодности к 3D-печати пищевые чернила должны обладать вязкоупругими свойствами, которые обеспечивают текучесть во время экструзии и переход в твердую структуру после нанесения, поддерживая форму и стабильность изделия [19,20].

Так, была изучена взаимосвязь между печатаемостью пищевых паст и их реологическими характеристиками. При исследованиях использовали картофельное и томатное пюре, температура в 3D-принтере регулировалась в диапазоне от 20 до 200 °C, температура экструзии — 25 °C. В результате проведенных исследований авторы отметили, что материалы для экструзии во время 3D-печати должны обладать рациональным соотношением параметров предела текучести и модуля упругости для поддержания печатной формы, а также иметь относительно низкие индексы консистенции и течения потока для легкого выдавливания из наконечника сопла в принтере экструзионного типа. Кроме этого, для оценки стабильности печати и силы экструзии пищевых паст в качестве индикатора необходимо использовать показатель напряжение сдвига [23].

Большинство исследований посвящено изучению влияния добавления гидроколлоидов, желатина и белковых ингредиентов в пищевые чернила на их реологические свойства, а также на повышение механической прочности и точности формирования структуры продуктов после 3D-печати [24–27].

На реологические свойства пищевых чернил значительно влияют гидроколлоиды, длинные полимерные цепи которых образуют 3D-сети под действием сил Ван-дер-Ваальса, гидростатических взаимодействий и/или водородных связей [24,25]. Добавление гидроколлоидов в рецептуру пищевых чернил существенно изменяет

реологические свойства смесей, таких как тесто, растительные аналоги мяса и йогурт, улучшая их пригодность для 3D-печати [26].

Вместе с тем углеводы, чаще всего сахара и крахмалы, используются в рецептурах пищевых чернил благодаря их термопластичным свойствам, обеспечивающим текучесть при экструзии в процессе 3D-печати [28]. Белки, полученные из сои или молока, обладают широким спектром функциональных возможностей, включая гелеобразование и эмульгирование, которые необходимы для определенных технологий 3D-печати [27]. Липиды, в том числе масла и жиры, обеспечивают пищевые продукты органолептическими свойствами и энергетической ценностью, а их текучесть при комнатной температуре способствует пригодности для процессов 3D-печати. Пищевые волокна, особенно целлюлоза, усиливают прочность напечатанных изделий и, благодаря растительному происхождению, поддерживают экологическую устойчивость продуктов [29].

Такие продукты, как мясо, фрукты, овощи и т. д., должны быть предварительно обработаны и дополнены гидроколлоидами в качестве добавок для улучшения их пригодности к 3D-печати [30]. Эти гидроколлоиды представляют собой разнообразную группу длинных цепей гидрофильных полимеров, состоящих из полисахаридов и некоторых белков, полностью или частично растворимых при диспергировании в воде. Наиболее широко используемыми гидроколлоидами являются камеди, за которыми следуют крахмал, целлюлоза, фикоколлоид и другие гидроколлоиды, такие как желатин и декстрины. Эти гидроколлоиды получают из растений (крахмалы, целлюлоза, гуаровая камедь, конжаковая камедь, арабская камедь, инулин), водорослей (альгинат, агар, каррагинан), животного сырья (желатин), микроорганизмов (гелановая камедь, ксантановая камедь) и из их модифицированных форм (модифицированные крахмалы и карбоксиметилцеллюлоза) [30]. Гидроколлоиды растительного происхождения являются более дешевыми, поскольку они требуют меньшей обработки для экстракции, в то время как фикоколлоиды, особенно полученные из морских водорослей, считаются самыми дорогими гидроколлоидами из-за стоимости процесса сбора и обезвоживания [22].

Добавление гидроколлоидов требует точного контроля, поскольку недостаточное их количество может привести к слабости консистенции, препятствующей сохранению формы напечатанного продукта, а избыточное — к чрезмерной твердости, делающей пищу непригодной для пациентов с дисфагией [31].

Так, на примере аналога котлеты, созданной из ферментированных соевых бобов, оценивали добавление глюкоманнана конжака с различными концентрациями (0, 2, 4 и 6 % по массе). Добавление конжака не оказывало значимого влияния на содержание белка и цвет приготовленной котлеты ($p > 0,05$), но существенно улучшало водоудерживающую способность ($p < 0,05$), приводя к повышению влагосвязывающих свойств. Кроме гидроколлоида — конжака, в рецептуру добавляли коньяк для улучшения вкусовых и текстурных качеств котлеты [26].

Nida и др. исследовали пригодность к 3D-печати фракций рисовой шелухи различной степени измельчения с добавлением гуаровой камеди и без нее [32]. Основная идея исследования заключается в том, что измельчение играет важную роль в обеспечении лучшей текучести продукта через сопло. Из-за сложности, связанной со свойствами волокнистых материалов при печати, добавление гидроколлоида снижает вязкость и водопоглощающую способность, что приводит к улучшению пригодности для печати измельченной рисовой шелухи. Стабильность слоев при печати достигалась при максимальной высоте сопла 0,2 мм и скорости потока 0,678 ± 0,003 г/мин. Таким образом, исследование демонстрирует возможность преобразования рисовой шелухи, непригодной для печати, в подходящий для 3D-печати материал [32]. Полученное вещество может использоваться как биоразлагаемый упаковочный материал для пищевых продуктов, способствуя снижению зависимости от небиоразлагаемых пластиков [32].

Scheele и др. [33] изучалась пригодность картофельного пюре для 3D-печати и придания ему правильной формы при добавлении богатых белком порошков из сверчка и гороха. В 100 г картофельного пюре вносили процентные доли этих добавок (5, 15 и 30 %) с различным соотношением воды и белка (0, 1, 2 и 3 %). Картофельное пюре с добавлением порошка из сверчков и горохового порошка обеспечивает высокую точность отпечатков при соотношении воды и добавок, равном 2 к 3 соответственно. Реологические испытания показали, что такое картофельное пюре имеет значения модуля упругости в диапазоне от 15 до 25 Па. Исследование взаимосвязи между точностью печати, модулем упругости и содержанием белка в картофельном пюре с добавлением белков сверчка и гороха выявило снижение точности формы и пригодности к 3D-печати при увеличении концентрации белковых добавок.

Целью работы Liu и соавторов [34] было создание пищевого имитатора для 3D-печати на основе молочного белка и исследование влияния концентрации изолята сывороточного белка (WPI) на эффективность печати концентрата молочного белка (MPC). Порошки изолята сывороточного белка и концентрата молочного белка в различных соотношениях были приготовлены в виде пасты (35 мас.%, общее содержание сухого вещества). Данные по реологическим свойствам и текстуре показали, что присутствие изолята сывороточного белка позволяет снизить вязкость и размягчить пасту концентрата молочного белка, улучшая процесс печати. Пастообразная смесь на основе сухого молока с добавлением MPC и WPI в соотношении 5:2 обеспечивает оптимальные реологические свойства для 3D-печати методом экструзии, позволяя точно воспроизводить разработанную 3D-модель. Кроме того, увеличение WPI постепенно повышает устойчивость к деформации биообъекта и улучшает пригодность для печати, что значительно отличалось от результатов, полученных Scheele и соавторами [33], где наблюдалась тенденция к снижению этих параметров. Это может быть связано с разницей в свойствах между картофельным пюре и концентратом молочного белка.

Еще одним важным фактором, влияющим на совместимость процесса экструзии в 3D-технологиях и на пригодность пищевого материала для печати, является добавление крахмала в качестве сырьевого ингредиента. Исследование, проведенное Anukiruthika и соавторами [35], позволило оценить пригодность для печати порошка яичного желтка (EY) и яичного белка (EW) с использованием смесей рисовой муки, богатой крахмалом, с помощью экструзионного 3D-принтера CARC. Результаты показали, что добавление наполнителя (рисовой муки в соотношении 1:1 и 1:2 по массе) оказало значительное влияние на повышение стабильности и прочности печатных материалов. Смесь яичного желтка и рисовой муки в соотношении 1:2 пригодна для 3D-печати с высокой точностью и четкостью слоев при следующих параметрах: сопло 0,84 мм, скорость печати 600–800 мм/мин, частота вращения двигателя 180 об/мин, скорость экструзии 0,005 $см^3/с$, с минимальными изменениями цвета.

Изучение вязкоупругих свойств смесей крахмал-манго и крахмал-арабиноксилан в качестве материалов для 3D-печати с учетом их поведения во время экструзии показало, что смесь с высоким содержанием крахмала имеет более высокую прочность геля, что улучшает печатные свойства при сохранении стабильной печатной структуры благодаря высокому тиксотропному индексу [36].

Были проведены исследования использования натурального кукурузного крахмала, а также трех типов модифицированных крахмалов, добавленных в эмульсионные гели для получения более качественных 3D-печатных изделий. Для производства гелей применяли кукурузный крахмал с содержанием амилозы 28 %, чистотой 98 % и влажностью 12,04 %, прежелатинизированный крахмал (содержание 99,9 %), окисленный крахмал (содержание 99 %) и карбоксиметилкрахмал натрия (содержание 99 %). Эмульсионные гели с добавлением различных крахмалов использовались в качестве биочернил для 3D-печати цилиндрических образцов со следующими параметрами 3D-печати: температура печати = 25 °C, диаметр сопла = 0,84 мм, плотность заполнения среднего слоя = 50 %, плотность заполнения трех нижних слоев и трех верхних слоев = 100 %, скорость печати = 15 мм/с. Тип крахмала существенно повлиял на печатные свойства композитных гидрогелей, образованных различными модифицированными крахмалами. Все модифицированные крахмалы снижали механическую прочность гелей, но разные типы модифицированных крахмалов вызывали существенно отличающиеся эффекты. Окисленный крахмал приводил к агрегации капель эмульсии и к увеличению размера частиц, но в некоторой степени улучшал термическую стабильность эмульсионного геля при большой разнице в размерах напечатанных изделий. Прежелатинизированный крахмал в геле с эмульсией подвергался значительной агрегации и взаимодействовал с белками, что снижало стабильность эмульсии. Это препятствовало формированию стабильной структуры при 3D-печати. Карбоксиметилкрахмал натрия увеличивал вязкость гелей и уменьшал размер частиц гелей, что способствовало равномерной экструзии нитей и слиянию между напечатанными слоями. Высокое содержание кукурузного крахмала и карбоксиметилкрахмал натрия в геле (> 20 %, по массе) и окисленного крахмала (20 %) позволило значительно повысить точность печати. Использование прежелатинизированного крахмала показало наиболее низкую точность печати из-за малого модуля упругости, недостаточной адгезии и недостаточных восстановительных свойств. Высокая механическая прочность геля с кукурузным крахмалом затрудняла экструзию

из сопла и вызывала образование толстых нитей при формовании продукта. Наиболее точно структура и форма при 3D-печати сохранялись при внесении в гель карбоксиметилкрахмала натрия. Тесты на текстуру и испытания IDDSI (капельный тест, тест давления вилкой, тест наклона ложкой) показали, что модифицированные крахмалы улучшают текстурные свойства гелей, обеспечивая создание пищевых продуктов, пригодных для пациентов с дисфагией. По мнению авторов, это исследование является эталоном для применения модифицированного крахмала в 3D-печати [37].

Благодаря исследованию 3D-печати желатиновых гелей из кожи лосося (SGG) различных концентраций (2%, 5%, 8%, 11%, и 14%), которая является побочным продуктом рыбной промышленности, было показано, что стабильная печатная модель была получена с использованием геля 8%-ной концентрации из-за его наиболее эффективной способности выдерживать вес слоев и сохранять хорошую форму [38].

Были исследованы реологические свойства смесей изолята соевого белка с альгинатом натрия и желатином на пригодность для 3D-печати. Рассмотренные смеси, обладая выраженной способностью к разжижению при сдвиге, являются наилучшим материалом для 3D-печати пищевых продуктов. Вязкость и модуль упругости смеси соевого изолята с желатином были ниже при температуре 35 °C, в то время как реологические показатели быстро повышались при снижении температуры до 25 °C, что обеспечивало сохранение структуры нанесенных слоев и сохраняло заданную форму. Смеси соевого изолята с 2, 6 и 10%-ным содержанием желатина позволяют получать печатные формы со стабильной геометрией. Добавление альгината натрия и желатина в смеси не привело к образованию химических сшивок между белковыми субъединицами во время смешивания и 3D-печати при температуре 35 °C, а также улучшило твердость и консистенцию геометрических фигур, напечатанных на 3D-принтере. Общие результаты показали, что пищевая матрица из соевого изолята, альгината натрия и желатина станет перспективным материалом для 3D-печати пищевых продуктов [39].

Пшеничная мука, широко применяемая в качестве добавки, повышает пригодность к 3D-печати и обеспечивает стабильность структуры пищевых материалов. Так, исследовалось использование рафинированной пшеничной муки в качестве добавки при введении в различных пропорциях в куриный фарш (1:1, 2:1 и 3:1 по массе) для улучшения его пригодности для 3D-печати за счет увеличения вязкости фарша. Для получения оптимизированной рецептуры 2:1 были изменены параметры экструзионной печати, которые составили: высота сопла 0,64 мм, размер сопла 0,82 мм, скорость печати 1000 мм/мин, скорость экструзии 8,8 мм$^3$/с, и давление экструзии 4 бара. Напечатанный на 3D-принтере образец куриного фарша был подвергнут последующей обработке путем сушки на горячем воздухе с последующим обжариванием во фритюре. Хрустящие куриные наггетсы, напечатанные на 3D-принтере, с энергетической ценностью 166,72 ± 0,07 ккал/100 г, могут быть изготовлены по индивидуальному заказу в любой форме, что позволяет использовать их в индустрии быстрого питания [17].

Важную роль в 3D-печати продуктов питания играют липиды. Они улучшают текстуру и вкусовые характеристики пищевых продуктов, обеспечивают необходимую смазывающую способность и адгезию в процессе печати, способствуя равномерному распределению и межслойному склеиванию слоев напечатанного материала. В контексте 3D-печати липиды выполняют множество важнейших функций. Жиры также могут быть составлены в филаменты с определенной температурой плавления для облегчения экструзии и затвердевания в процессе печати. Кроме того, липиды могут инкапсулировать биологически активные соединения, обогащая питательную ценность и функциональность конечного пищевого продукта [40,41].

Методы 3D-печати на основе горячего расплава и холодной экструзии обычно используются для 3D-печати шоколада, продукта с высоким содержанием липидов. Какао-масло является основным ингредиентом шоколада с содержанием в диапазоне 23–35%.

Кристаллическая морфология и температура плавления какао-масла существенно влияют на характеристики шоколада при 3D-печати. В технологии 3D-печати текучесть, скорость осаждения и межслойная адгезия шоколада тесно связаны с кристаллической формой какао-масла. Температура плавления какао-масла, обычно колеблющаяся от 32 до 36 °C, имеет важное значение для 3D-печати, поскольку она гарантирует, что шоколад будет сохранять необходимую текучесть во время экструзии и быстро застывать при охлаждении для сохранения целостности формы напечатанной фигуры. Был разработан шоколад с пониженным содержанием жира, подходящий для 3D-печати. Путем добавления эмульсии воды в масле была сбалансирована рецептура шоколада, сохраняющая при этом необходимую кристаллическую форму и температуру плавления [41]. Однако следует учитывать, что индекс жир/сухое вещество, который количественно определяет соотношение какао-масла к общему содержанию твердых веществ в шоколаде, оказывает значительное влияние на вязкость и характеристики потока экструзии шоколада. Повышенный индекс означает более высокую концентрацию какао-масла, что потенциально может привести к более упорядоченному и плавному процессу экструзии. Тем не менее это может потребовать корректировки параметров печати для предотвращения таких дефектов, как растекание или размазывание материала. 3D-печать шоколада на основе экструзии горячего расплава дает преимущества с точки зрения простоты и доступности. Однако это требует строгого контроля температуры и использования дополнительного охлаждающего оборудования [29].

Метод холодной экструзии обеспечивает эффективную 3D-печать шоколада, однако высокое содержание липидов и повышение температуры при экструзии через сопло могут снижать прочность и стабильность структуры напечатанного продукта. Чтобы противодействовать этому, исследователи включили такие добавки, как какао-порошок, олеогель и экстракт рожкового дерева. Путем тонкой настройки соотношения липидов относительно других компонентов в шоколадной смеси можно оптимизировать реологические свойства. Такая оптимизация приводит к более эффективному и качественному процессу 3D-печати [29].

В нескольких исследованиях сообщалось о влиянии состава и параметров печати на свойства сыра, напечатанного на 3D-принтере. Например, цитрат тринатрия был добавлен в сыр чеддер в качестве добавки для хелатирования кальция, эмульгирования жиров и стимулирования дисперсии казеина, что может улучшить полутвердые свойства и пригодность сыра к 3D-печати [42]. Реологические методы позволили установить оптимальный диапазон вязкости (7,55–10,94 Па·с), обеспечивающий стабильную 3D-печать плавленого сыра с беспрепятственной экструзией и формированием слоистой структуры. Установлено, что добавление плавленого сыра с pH 5,8 обеспечивает напечатанный продукт с более мягкой и эластичной текстурой по сравнению с сыром с pH 5,4 или 5,6. Сыр, содержащий исключительно свежий творог, был значительно тверже, чем сыр, содержащий мягкий или зрелый сыр Чеддер. Благодаря 3D-печати при более высоких температурах (60 °C) сыр получается более твердым и эластичным, чем при печати при более низких температурах (40 °C).

*5.2. Основные проблемы 3D-печати мясных продуктов и их аналогов*

Возможность создавать индивидуальные мясные продукты может сохранить огромные ресурсы, необходимые для животноводства, и преодолеть значительные экологические проблемы, устранить препятствия на пути устойчивого развития пищевых технологий.

Применение 3D-печати в мясных технологиях по-прежнему связано со многими проблемами, однако объем исследований, направленных на их решение, неуклонно расширяется.

Мясные материалы, используемые в 3D-печати, можно представить как многофазную коллоидную систему, где вода является непрерывной фазой. В то же время белки, углеводы и неорганические соли составляют дисперсную фазу. Указанная система отличается сложными реологическими свойствами, что делает ее непригодной для процедур печати и представляет серьезную проблему для развития технологии 3D-печати [43].

Предварительная обработка улучшает пригодность мясных материалов к печати за счет улучшения их реологических и гелеобразующих свойств, которые имеют решающее значение для достижения требуемого эффекта. Это достигается за счет стимулирования взаимодействия между коллоидами в системе фарш-вода или путем добавления других гидроколлоидов в измельченное мясо, что позволяет мясной пасте сохранять низкую вязкость во время экструзии, обеспечивая при этом достаточную вязкость и предел текучести для сохранения формы и поддержки последующих слоев при формовании. Видами предварительной обработки, повышающими пригодность мяса к печати, являются [44]:

- ультразвуковая обработка, которая усиливает реологические и гелеобразные свойства миофибриллярного белка [45];
- микроволновая обработка. Тепловой эффект микроволнового излучения денатурирует белки в системе фарша и обратимо связывает их с образованием растворимых агрегатов, тем самым изменяя некоторые белки из золя в гель и увеличивая самоподдерживающуюся способность мясной начинки [46];
- обработка под высоким давлением влияет на структурные и функциональные свойства белков, способствует адсорбции белка на границе жир/вода, что улучшает эмульгацию пищевых

чернил, повышает термическую стабильность белков, способствует гелеобразованию и фиксирует свободную воду, в результате чего получаются плотные и однородные гели [47,48]. Кроме того, высокое давление может улучшить текстуру и пригодность мяса к печати за счет повышения эластичности, удержания воды и адгезии; вместе с тем следует отметить, что технологии высокого давления в 3D-печати нуждаются в дальнейшем развитии [44].

Dick и соавторы [49] разработали 3D-печатный продукт из говядины с композитным слоем на основе экструзии с двумя соплами и изучили влияние содержания жира и плотности заполнения (50, 75 и 100%) на печать и свойства продукта. Основа мясной пасты состояла на 85% из говядины и на 15% из воды с добавлением 1,5% NaCl и 0,5% гуаровой камеди для печати конструкций с использованием прямоугольной призматической конструкции (40 × 40 × 10 мм = Д × Ш × В). Слои свиного жира (0, 1, 2 и 3 слоя высотой 1 мм) располагались во внутренней части конструкции (по 2 мм с каждой стороны), окруженные мясной пастой (по периметру и сплошными верхним и нижним слоями) для уменьшения выделения жира с боков напечатанных мясных изделий при постобработке при приготовлении методом су-вид.

На основе предварительных испытаний были определены следующие параметры печати: высота слоя 1,95 мм и высота первого слоя 1,5 мм для экструдера 1 (мясная паста), высота слоя 1 мм для экструдера 2 (сало), 2 вертикальных периметра оболочки, 2 сплошных слоя сверху и снизу, скорость 20 мм/с и скорость потока 100%. Производство 3D-печатных продуктов из говядины требует уменьшения размера частиц мяса, что снижает затраты, делая технологию особенно подходящей для переработки дешевых, малоиспользуемых и жестких кусков говядины [49].

Внесение пищевых добавок или предварительная обработка являются важными способами улучшения свойств обычного мяса для обработки с помощью 3D-печати. Липиды — важные компоненты в повышении производительности 3D-печати мясных продуктов. При нагреве мясных чернил липиды заполняют сетчатую структуру, образованную денатурированными белками, или сополимеризуются с ними, формируя эмульгированные гели. Такие гели повышают текучесть материала, снижают его вязкость и улучшают эффективность экструзии через сопло 3D-принтера [50]. Например, печатная пригодность мяса индейки была значительно повышена за счет добавления беконного жира с последующим ферментативным сшиванием с использованием трансглютаминазы [51]. В идеале напечатанный мясной продукт должен выдерживать обработку после 3D-печати с сохранением формы и размеров продукта. Тем не менее жиры часто вызывают усадку мяса, напечатанного на 3D-принтере, во время постобработки. В частности, отклонение размеров (особенно отклонение по высоте) композитных многослойных мясных продуктов увеличивалось по мере повышения содержания жира. Поэтому при реальной 3D-печати мяса количество жира должно контролироваться таким образом, чтобы мясо плавно вытекало через сопло, а также выдерживало термическую обработку без деформации. Помимо добавок, предварительная обработка микроволновым нагревом также является способом улучшения характеристик мясной 3D-печати. Zhao и соавторы использовали синергетический подход микроволнового нагрева и TGase для достижения самосклеивания сурими в процессе печати [51].

Изменяя соотношение мясных и немясных ингредиентов в рецептурах мясных чернил, можно улучшить их реологию и пригодность к печати, а также получить продукты, богатые питательными веществами.

В исследовании Chen и соавторов [52] проведена оценка влияния шести гидроколлоидов на пригодность чернил TSP (textured soybean protein) и DSP (drawing soy protein) для 3D-печати стейковых продуктов. Изучена текстурная разница между жареными образцами, напечатанными на 3D-принтере, и жареной коммерческой куриной грудкой (контроль). Результаты демонстрируют, что использование различных чернильных подложек (TSP, DSP) и гидроколлоидов (ксантовой, конжаковой, гуаровой камедей, альгината натрия, карбоксиметилцеллюлозы натрия, гидроксиэтилцеллюлозы) обеспечивает стабильную 3D-печать. Чернила, состоящие из TSP и ксантановой камеди, обладали наилучшими печатными характеристиками и целостностью образца после обжарки. В исследовании было установлено, что различные схемы наполнения и скорости заполнения оказывали существенное влияние на текстурные свойства обжаренных образцов. Треугольная форма заполнения использовалась со скоростью заполнения 60%, продукт имел наиболее близкую к контрольному образцу твердость (2585,13 ± 262,55), жевательность (1227,18 ± 133,00) и липкость (1548,09 ± 157,82.

Исследование показывает целесообразность включения гидроколлоидов в рецептуру чернил для печати стейкоподобных продуктов, схожих с куриной грудкой.

Аналоги мяса рассматриваются как перспективное решение, направленное на удовлетворение потребительского спроса на мясные продукты.

Современные аддитивные технологии производства аналогов мяса — это в основном термоэкструзия, процесс измельчения, электроформование (электропрядение), структурирование сублимацией и формование белка [25,53]. Основным недостатком данных методов является ограниченная вариабельность формы и структуры аналогов мяса. Однако потребности различных групп потребителей, включая пациентов с дисфагией, пожилых людей и лиц с особыми диетическими требованиями, предполагают необходимость создания продуктов с разнообразными формами и свойствами. В этом контексте большой интерес может представлять технология трехмерной (3D) печати. Технология 3D-печати позволяет создавать продукты сложной формы, с индивидуальным подходом к питанию, внешним видом, текстурой, вкусом и другими сенсорными свойствами [25,54].

Канадскими исследователями изучалось влияние добавления гидроколлоидов на 3D-печать аналогов мяса на основе растительного белка. Чернила были созданы на основе изолята соевого белка, глютена, рапсового масла и воды. В рецептуры аналогов мяса добавляли гидроколлоиды (ксантановую камедь, пектин, гидроксипропилметилцеллюлозу, гуаровую камедь, камедь рожкового дерева). Разработанные чернила были использованы для создания определенной геометрии цилиндрической 3D-модели растительного аналога мяса, который был подвергнут обжариванию во фритюре (при температуре 180 °C, в течение 90 с) в рапсовом масле, так как перед употреблением растительные аналоги мяса требуют тепловой обработки [54].

Результаты показали, что введение гидроколлоидов повлияло на вязкость мясных аналогов чернил, которая составила 3871–5482 Па·с, при этом параметры: скорость 3D-печати (0,34–0,39 г·с$^{-1}$), погрешность печати (2,51–10,37%), точность печати (81,97–97,27%), стабильность размеров (91,22–98,61%) и потери при варке (5,69–14,23%) значительно ($p < 0,05$) зависели от добавления вида гидроколлоида. Соотношение влаги и жира в сырых аналогах мяса, напечатанных на 3D-принтере, было идентичным, однако наблюдались различия в цветовых характеристиках образцов с добавлением гидроколлоидов. Обжаривание во фритюре существенно повлияло на качество аналогов мяса, напечатанных на 3D-принтере. Во время обжаривания во фритюре потеря влаги, поглощение жира и изменение цвета были связаны с типами гидроколлоидов, которые были включены в состав чернил для аналогов мяса. Так, сравнение содержания жира в опытных и контрольном (без гидроколлоидов) образцах показало, что все используемые гидроколлоиды были высокоэффективными для снижения поглощения жира при жарке 3D-печатных аналогов мяса, так как содержание жира в исследуемых образцах (в диапазоне от 0,38 до 0,43 г/г) было значительно ниже, чем в контрольных образцах (0,51 г/г). Наряду с этим ученые отмечают, что гидроколлоиды, такие как гуаровая камедь, пектин, камедь рожкового дерева, ксантановая камедь и т. д., целесообразно использовать при создании пищевых чернил для 3D-печати аналогов мяса [25,55].

Koranne и соавторы представили результаты процесса 3D-печати пищевых продуктов для скаффолдов, изготовленных из пищевого гидролизованного коллагена, предназначенного для биопроизводства культивируемого мяса [56].

Мясные продукты и их растительные аналоги требуют приготовления или нагрева перед употреблением. В связи с этим ключевое значение имеют процессы обработки продукта после 3D-печати.

Так, добавление гидроколлоидов, а также типы используемых гидроколлоидов в чернилах, аналогичных мясным, оказали значительное влияние на структуру поверхности, химический профиль и температуру стеклования аналогов мяса, напечатанных на 3D-принтере и обжаренных во фритюре [54]. Также изучалось влияние добавления гидроколлоидов (в качестве ингредиента рецептуры чернил) и жарки во фритюре на параметры процесса 3D-печати, теплофизические, структурные и физико-химические свойства мясных аналогов. Включение гидроколлоидов в рецептуру аналогов чернил для мяса не только улучшает процесс 3D-печати, но и обеспечивает сохранение размеров продукта, снижает потери при приготовлении, стабилизирует термохимическую природу 3D-печатных объектов во время их постпечатной обработки во фритюре [54]. Таким образом, можно сделать вывод, что добавление гидроколлоидов в рецептуру чернил для 3D-печати аналогов мяса будет эффективно для модификации свойств используемых растительных белков.

В работе [57] изучали характеристику термомеханических переходов при жарке продуктов на основе мяса и растительных аналогов в панировке из пшеничной и рисовой муки. Обжарку во фритюре производили при температуре 180 °C в рапсовом масле. Ученые-исследователи установили, что рецептура кляра существенно влияет на температуру стеклования (Tg) покрытия жареных продуктов, т. е. корочки. Tg корочки жареных продуктов колебалась от –20 °C до –24 °C. Tg положительно коррелировала со временем обжарки и внутренней микропористостью (%) и отрицательно — с содержанием влаги. Внутренняя микроструктура сильно влияет на текстурные характеристики (твердость, хрупкость, хрустящую корочку). Отрицательное значение Tg способствует изменениям текстуры растительных аналогов мяса после жарки, проявляющимся в переходе от твердой и хрупкой к мягкой и пластичной структуре при комнатной температуре (25 °C) и инфракрасном нагреве (65 °C).

Авторы подчеркивают, что, несмотря на популярность и скорость метода обжарки во фритюре, этот способ приготовления пищи ассоциируется с повышенным риском ожирения и ишемической болезни сердца [58,59].

Изолят соевого белка, метилцеллюлоза, изолят сывороточного белка и изолят белка пшеничного глютена являются лучшими материалами для покрытия, в зависимости от субстрата. Они позволяют снизить поглощение масла на 35–40 %. Исследования также показывают, что большая часть масла в жареных продуктах поглощается во время охлаждения (после жарки), чем во время жарки. Поэтому требуются дальнейшие исследования влияния гидроколлоидов на эффективность 3D-печати аналогов мяса. Это также позволит оптимизировать состав для уменьшения содержания масла. Например, для снижения содержания жира в жареных продуктах было предложено использовать гидроколлоидное покрытие [60,61].

Одним из подходов к 3D-печати мясных продуктов является биопечать живых клеток. Kang и соавторы [62] разработали инженерную ткань, имитирующую стейк (диаметр 5 мм, длина 10 мм), используя биопечать клеток крупного рогатого скота: мышечных, жировых и сосудистых. Всего было создано 72 волокна, включая 42 мышечных, 28 жировых и 2 сосудистых.

По мнению Dong и соавторов [44], одним из ключевых преимуществ биопечати мяса является ее потенциал для решения проблем устойчивого развития за счет минимизации затрат природных ресурсов на обеспечение потребностей животноводства.

Разработка способа культивирования биомассы миобластов (мышечных клеток), полученных из мышц рыбы, позволила создать технологию для производства искусственного мяса стерляди в 3D-принтере из выращенных мышечных клеток [63].

Ученые из ДГТУ и ВолгГМУ разработали технологию биопечати гибридного культивированного мясного продукта — он получен с использованием мышечных клеток кролика, альгината натрия и белка подсолнечника в скаффолде [64].

Новый подход к 3D-печати пищевых продуктов с использованием выращенных растительных клеток дает возможность регулировать свойства продукта и создавать изделия с заданными биохимическими характеристиками. Разработанная технология позволит создавать продукты с заданными текстурой, питательностью, внешним видом и вкусом [65].

*5.3. Применение 3D-печати для персонализированного питания*

В последние годы рынок демонстрирует расширение возможностей персонализации продуктов питания с учетом вкусовых предпочтений, эстетических характеристик и диетических потребностей потребителей. Существует два варианта производства продуктов питания с учетом индивидуальных особенностей. Один из них заключается в использовании большого набора материалов, достаточного для удовлетворения запросов всех потребителей, а другой — в применении небольшого набора материалов, который можно комбинировать в различных пропорциях. Однако стоимость таких продуктов питания относительно высока.

Пищевые свойства 3D-печатных продуктов можно улучшить путем снижения гликемического индекса, регулирования калорийности и повышения содержания растворимой клетчатки, омега-3 жирных кислот и белка. Кроме того, с помощью этих методов возможно обогащать продукт витаминами, микро- и макроэлементами. Персонализация пищевых продуктов позволяет учитывать диетические потребности различных групп потребителей: пациентов с различными заболеваниями, детей, пожилых людей, беременных женщин, спортсменов, лиц, выполняющих тяжелую физическую работу, и т. д.

Технология 3D-печати позволяет создавать пищевые продукты со сложной формой, персонализированными питательными характеристиками, заданными внешним видом, текстурой и сенсорными свойствами [25,55,66]. Она также обеспечивает регулирование консистенции, позволяя производить продукты с пониженным содержанием соли, сахара и жиров [67].

Pereira и соавторы [1] отмечают, что важным фактором приемлемости пищи для потребителей, помимо внешнего вида и вкуса, является текстура. Пожилые люди и люди с дисфагией чаще страдают от недоедания из-за визуальной и текстурной непривлекательности пищи. Однако в литературе, посвященной 3D-печати пищевых продуктов, практически не уделяется внимания адаптации пищевых привычек и поведения, необходимой для широкого внедрения таких продуктов у пациентов с нарушениями глотания, подверженных риску недоедания, аспирационной пневмонии или удушья [68]. Диеты с модифицированной текстурой, включающие загущенные жидкости и пюре, помогают пациентам с дисфагией, вызванной инсультом, онкологическими заболеваниями или нервно-мышечными расстройствами, предотвращать аспирационную пневмонию и улучшать качество питания [69]. Пациенты с дисфагией часто потребляют недостаточно калорий, так как модификация текстуры пищи включает разбавление водой или другими жидкостями, что снижает калорийность смеси [70].

Систематизация данных научных исследований показала целесообразность внесения пробиотических бактерий, продуцирующих антимикробные вещества и оказывающих благотворное влияние на состояние иммунитета человека, в смеси для печати продуктов питания. Учитывая термическое воздействие при 3D-печати, необходимо обеспечить максимально возможную выживаемость пробиотических бактерий. Рядом исследователей была оценена выживаемость бактерий *Lactobacillus plantarum*, цианобактерий *Nostoc sphaeroides* в смесях на основе картофельного крахмала, *Bifidobacterium animalis* при введении в картофельное пюре при 3D-печати. Для бактерий *Lactobacillus plantarum* показано, что в диапазоне температур от 145 °C до 205 °C концентрация бактерий не изменялась, в то же время при выпекании при 145 °C в течение 6 мин концентрация бактерий составляла больше $10^6$ КОЕ/г. При гидратации цианобактерий *Nostoc sphaeroides* в смесях на основе картофельного крахмала качество создаваемых продуктов значительно повышается. При экструзии смеси из картофельного пюре с *Bifidobacterium animalis* с использованием самого маленького диаметра (0,6 мм) сопла 3D-принтера концентрация бактерий уменьшалась очень незначительно. Однако при нагревании в течение 45 мин при температуре 55 °C концентрация бактерий *Bifidobacterium animalis* существенно снижалась [71].

Итальянские ученые исследовали возможности использования технологии 3D-печати для разработки персонализированных формул питания, в частности, для создания 3D-закусок (снеки), обеспечивающих суточную калорийность 5–10 % и обогащенных кальцием, железом и витамином D, для детей от 3 до 10 лет [72]. В состав продукта входят свежие бананы (*Musa acuminata Colla*) сорта *Dwarf Cavendish*, сушеные грибы (*Boletus edulis*), консервированная белая фасоль, сухое обезжиренное молоко и лимонный сок, а также пектиновый порошок E440. В качестве антиоксиданта использовали аскорбиновую кислоту. Было изучено влияние двух переменных печати на качество напечатанных снеков: 1) скорость печати (мм/с), определяющая скорость осаждения материала; 2) уровень текучести (%), который указывает на количество материала, выдавленного во время печати. Расход на 70 % означает снижение на 30 % количества шагов двигателя на миллиметр экструзии филамента по сравнению с условиями печати по умолчанию, предложенными производителем. И наоборот, расход в 130 % означает увеличение количества шагов двигателя на 30, что соответствует увеличению скорости осаждения материала на 30 %. В ходе экспериментов использовались три различных уровня для обеих переменных печати: скорость печати 30 мм/с, 50 мм/с и 70 мм/с; расход 70 %, 100 % и 130 %.

При печати при более низком уровне текучести потока пищевой смеси внутренняя структура снеков была неравномерной, с прерывистыми нитями продукта и чрезмерной пористостью. С другой стороны, при повышении уровня текучести потока увеличивалась толщина внутренней структуры образцов, поскольку нити продукта сливаются друг с другом. Это приводило к уменьшению пористости снеков и к увеличению размеров и общего объема. На скорость роста массы продукта влияли как скорость печати, так и уровень потока, достигающие максимальной скорости 0,00362 г/с при потоке 130 % и скорости печати 70 мм/с. Эти исследования доказали возможность получения инновационных продуктов питания желаемой формы и размера, в том числе персонализированной формулы питания [72].

В будущем технологии микрокапсулирования и 3D-печати позволят повышать питательную ценность продуктов для пациентов

с дисфагией за счет включения в рецептуру антиоксидантов, а также биоактивных гидрофобных веществ — токоферолов и полифенолов [73]. Это поможет повысить их биодоступность и минимизировать чувствительность к температуре, pH и окислению [69].

Pant и соавторы [74] разработали новую форму персонализированных продуктов питания, напечатанных на 3D-принтере, из свежих овощей: бок-чоя (китайская черешковая капуста), зеленого горошка и моркови с добавлением гидроколлоидов (ксантановая камедь, каппа-каррагинан и камедь рожкового дерева), которые сохраняют питательные вещества, обеспечивают формирование необходимой текстуры и улучшают привлекательную форму продукта.

Qiu и соавторы [75] оценили применимость камеди льняного семени (0–1,5 %) как текстуромодифицирующего средства для приготовления продуктов для пациентов с дисфагией на основе белка бобов мунг и порошка розы. Чернила, содержащие 0,3–1,2 % камеди льняного семени, имели однородную текстуру, лучшую вязкость, модуль упругости и предел текучести, чем смесь бобов и порошка розы. Дальнейшее увеличение содержания камеди льняного семени до 1,5 % усилило несовместимость между измельченными бобами мунг и камедью льняного семени, приведя к разделению их по микрофазам, что ухудшило качество печати и стабильность отпечатанных форм. Пищевые чернила с содержанием камеди льняного семени 0,9 % легко глотаются и обеспечивают наилучшие характеристики печати, а также не препятствуют перевариванию смеси *in vitro*.

Yun и соавторы [76] разработали пищевые чернила для 3D-печати на основе порошка моллюска морского ушка (галиотиса), соевого белка и желатина, обеспечивающие текстуру, которая соответствует требованиям к продуктам для пожилых людей. Повышение пригодности для печати при изготовлении каркасных структур из белков морского ушка было достигнуто за счет добавления желатинизированного крахмала в различных концентрациях (0, 1, 3, 5 и 7 %). Добавление крахмала в количестве 3 % показало наиболее оптимальное разрешение 3D-печати [76].

Чтобы увеличить разнообразие пищевых продуктов на основе животного белка, доступных для пациентов с дисфагией и трудностями при жевании и глотании, разработан продукт из свинины с модифицированной текстурой, напечатанный на 3D-принтере [77]. Свиную ногу варили при 150 °C в воде в течение 65 минут, измельчали, а затем получали печатную мясную пасту с добавлением поваренной соли, дистиллированной воды, гуаровой камеди и/или ксантановой камеди. Контрольные образцы были разработаны без добавления гидроколлоидов. Различий в стабильности среди образцов, содержащих гидроколлоиды, не наблюдалось, однако, по сравнению с контрольными образцами, образцы, содержащие гидроколлоиды, обладали более высокой вязкостью, что свидетельствует об улучшении стабильности пищевой матрицы. Текстура напечатанных образцов, обработанных по-разному (охлажденных до 37 °C, замороженных при минус 18 °C или нагретых при 100 °C в течение 7 минут), показала существенные различия. Образцы, содержащие гидроколлоиды, по отдельности или в сочетании показали более низкую твердость и когезивность, чем контрольный образец после нагревания. Отмеченные текстурные изменения связаны с формированием менее плотной матрицы продукта с увеличенными неоднородными полостями в результате дополнительной задержки воды при добавлении гидроколлоидов. Разработанный мясной продукт был отнесен к категории потенциальных переходных продуктов питания в рамках Международной инициативы по стандартизации рациона питания при дисфагии (IDDSI) [77].

Учитывая важность пищевых волокон для здоровья кишечника, Lille и соавторы [78] разработали напечатанную на 3D-принтере пищевую закуску, богатую клетчаткой и белком. Было использовано сухое молоко с содержанием 27 % белка, 41 % углеводов, 25 % жира и цельнозерновой ржаной муки, состоящей из 10 % белка, 57 % углеводов, 2,3 % жира и 20 % пищевых волокон. Пищевые чернила на основе сухого молока и ржаной муки в соотношениях 1:0, 1:1, 1:3, 3:1 и 0:1 использовали для 3D-печати сетчатых конструкций с последующим выпеканием при 150 °C. Печать выполнялась при температуре окружающей среды на 3D-принтере Foodini (Natural Machines Inc., США) с применением капсулы для печати с соплом диаметром 1,5 мм. Напечатанный узор представлял собой решетчатую структуру из ячеек (5 × 3) с внешними размерами около 67 × 40 мм. Предел текучести сетчатой структуры, определяющий начало ее разрушения и течения, варьировался от 10 до 60 Па. Паста на основе ржаной муки имела наименьший предел текучести, а паста с составом 25 % ржаной муки и 75 % сухого молока — наибольший. Испытания пищевых чернил с различными соотношениями сухого молока и ржаной муки показали, что все рецептуры были пригодными для 3D-печати и способствовали стабильности формы после печати. Однако, несмотря на это, при выпечке образцов при температуре 150 °C чернила с высоким содержанием сухого молока значительно расширялись, что приводило к разрушению напечатанной формы. Данный дефект может быть устранен за счет включения в рецептуру ржаной муки. Сухое молоко придавало объем и блеск поверхности («глянцевость») выпекаемым образцам, в то время как ржаная мука, по-видимому, повышала стабильность и прочность выпечки. Тем не менее концепция создания персонализированных продуктов питания с помощью 3D-печати все еще находится на ранней стадии разработки, и необходимо проделать дополнительную работу для преодоления технологических трудностей [78].

Mirazimi и соавторы [79] оценили реологические и текстурные измерения картофельного пюре, предназначенного для пациентов с дисфагией, при добавлении соевого белка и агара. Рецептуры обогащенных картофельных пюре были получены путем добавления соевого белка (3 %, 5 % и 7 %) и агара (до 0,2 %). Исследованиями установлено, что реологические свойства пюре на основе крахмала улучшаются при добавлении агара в низких концентрациях. Кроме того, механическая прочность улучшается с добавлением агара благодаря его сильным водородным связям и образованию гидрофобных агрегатов. Добавление соевого белка приводило к сильным изменениям в текстуре и питательной ценности составов.

Специалисты Института мясо-молочной промышленности республики Беларусь [80,81] разработали специальные смеси для пищевого 3D-принтера, содержащие натуральное мясное сырье без применения красителей, консервантов и стабилизаторов. Использование аддитивных технологий в мясоперерабатывающей промышленности и сегменте HoReCa позволяет создавать натуральные уникальные высококачественные 3D-продукты (полуфабрикаты и кулинарные изделия) с учетом индивидуальных физиологических потребностей потребителя. Это способствует развитию персонифицированного, лечебно-профилактического и диетического, спортивного, детского, геродиетического питания, оказывает положительное влияние на укрепление здоровья нации и обеспечивает повышение конкурентоспособности пищевой промышленности Республики Беларусь [81].

В своем выступлении в Московском государственном университете пищевых производств директор ФНЦ пищевых систем им. В. М. Горбатова РАН Оксана Кузнецова отметила: «Биопринтинг имеет особую прикладную ценность в специализированном питании. По этой технологии можно создать продукт, необходимый человеку по состоянию здоровья, причем «напечатанная» пища будет не протеиновой обогащенной смесью, а едой, очень похожей на привычную. Разумеется, такой продукт не заменит традиционный, но станет хорошим дополнением к рациону»[26].

## 6. Методы оценки эффективности 3D-печати пищевых продуктов

С развитием технологии 3D-печати разрабатывается и внедряется все больше технологий инженерной оценки биоматериалов, так как характеристики материала имеют решающее значение для процесса 3D-печати. Например, реологические свойства материала могут быть определены с помощью реотестов, свойства текстуры — с помощью анализатора текстуры, свойства порошков — сканирующей электронной микроскопией (СЭМ) и рентгенографией и т. д. [21].

В основе явления ядерного магнитного резонанса (ЯМР) лежат магнитные свойства атомных ядер с ненулевым спином. ЯМР широко используется в пищевой промышленности, например, для мониторинга распределения и миграции молекул воды при сушке пищевых продуктов [82,83], для оценки влияния состояния гидратации мясного белка на подвижность воды и жира в мясных фаршах [84]. В настоящее время метод низкопольного ядерного магнитного резонанса (НП-ЯМР/LF-NMR) используется в качестве метода анализа реологических свойств и текстуры при 3D-печати пищевых продуктов, поскольку наличие воды в пищевом сырье и продуктах является важным свойством, определяющим их реологические характеристики [21].

Liu и соавторы представили метод, основанный на использовании низкопольного ядерного магнитного резонанса (НП-ЯМР), для быстрого прогнозирования характеристик 3D-печати картофельного пюре, который позволяет оценить пригодность для печати конкретных материалов без проведения длительных экспериментов с печатью образцов [85]. Авторы провели исследования, включающие:

[26] Ученые и аспиранты МГУПП экспериментируют с биопринтингом. Retrieved from https://meat-expert.ru/news/12348-uchenye-i-aspiranty-mgupp-eksperimentiruyut-s-bioprintingom?ysclid=m7lvfb5f2606975619. Accessed February 20, 2025.

(1) определение реологических свойств для 3D-печати картофельного пюре с различными рецептурами; (2) корреляционный анализ реологических свойств и оценку эффективность печати с помощью анализа основных компонентов (PCA); (3) определение возможности использования реологических свойств для оценки эффективности 3D-печати с помощью дискриминантного анализа Фишера; (4) установление корреляции между параметрами НП-ЯМР и реологическими свойствами картофельного пюре [85].

Была предложена технология НЧ-ЯМР для точной оценки влияния предварительной микроволновой обработки на реологические свойства теста и эффективность 3D-печати, учитывая, что микроволновая обработка ведет к желатинизации крахмала в тесте и к изменению распределения воды в нем. Корреляционный анализ Пирсона показал, что реологические параметры теста и параметры НП-ЯМР были взаимосвязаны. На основе исследований была разработана прогнозная модель с точностью более 90%. Модель базируется на НП-ЯМР и частичной регрессии методом наименьших квадратов для быстрого определения эффективности печати [21].

Phuhongsung и соавторы [86] также установили значительную корреляцию реологических свойств гелей соевого белка, содержащих (или не содержащих) ксантановую камедь или раствор NaCl в различных концентрациях, с параметрами низкопольной ЯМР-спектроскопии. Эти параметры позволяют прогнозировать пригодность гелей для 3D-печати.

Проведены сравнительные исследования эффективности НП-ЯМР и диэлектрической спектроскопии при прогнозировании реологических свойств и возможности 3D-печати гелей суримы. Анализ потенциала низкопольного ядерного магнитного резонанса и диэлектрических характеристик (на частотах 915 и 2450 МГц) для прогнозирования реологических свойств и оценки печатной пригодности гелей суримы с различными концентрациями растворов NaCl показал, что применение дискриминантного анализа НП-ЯМР обеспечивает более высокую точность классификации характеристик печати, а модели регрессии по методу частичных наименьших квадратов, использующие НП-ЯМР для прогнозирования основных реологических свойств, имели лучшую прогностическую точность и надежность [87].

Еще один способ оценки эффективности 3D-печати пищевых материалов осуществляется с помощью компьютерного моделирования на основе вычислительной гидродинамики (CFD) [21]. Этот метод, широко применяемый в пищевой промышленности для моделирования процессов сушки, охлаждения, стерилизации, выпечки и смешивания, задействует физические, математические и численные подходы для анализа потоковых процессов.

CFD позволяет прогнозировать в пищевой промышленности не только поведение потоков жидкости, но и химические реакции, механические перемещения, фазовые переходы, тепло- и массообмен. Для описания реологических свойств применяются дифференциальные уравнения переноса Навье-Стокса, учитывающие массу, импульс и энергию жидкости, а также уравнения состояния плотности [21]. Исследования по применению CFD сосредоточены на численном моделировании процесса экструзии пищевых продуктов для понимания характеристик течения жидкости внутри экструдера. Поскольку процесс экструзии используется в 3D-печати пищевых продуктов, особенно в технике экструзионной печати, предположено, что CFD может быть применен для прогнозирования и оценки характеристик материалов при 3D-печати пищевых продуктов [21].

Guo и соавторы [88] сравнили два метода 3D-печати пищевых продуктов на основе экструзии с использованием шнека и шприца. Оценка проводилась по характеристикам потока жидкости и профиля печати с помощью CFD и экспериментальной печати. Компьютерная имитационная модель показала, что зависимости характеристик текучести материала по профилю скорости сдвига и распределению давления в шприцевых принтерах во время экструзии были более простыми, их можно было легко настроить. В то же время характеристики течения материала в шнековых принтерах во время экструзии были относительно сложными, с обратным течением жидкости во внутренней полости. Более того, экспериментальная 3D-печать показала, что шнековые 3D-принтеры не подходят для экструзии пищевых чернил с высокой вязкостью. Таким образом, определено, что CFD обладает потенциалом для прогнозирования характеристик пищевых материалов при 3D-печати пищевых продуктов [88].

Используя технологию компьютерного моделирования вычислительной гидродинамики, Guo и соавторы [88] также разработали точный, простой и быстрый метод оценки пригодности материалов для 3D-печати пищевых продуктов на основе экструзии. Гели из выбранных зерновых культур (черный рис, семена бусенника (Иовлевы слезы), бобы мунг, коричневый рис и гречневая крупа) были протестированы в качестве потенциальных материалов для 3D-печати. Моделирование CFD проводилось с использованием модели Берда-Карро (Bird-Carreau), поскольку тестируемые зерновые гели представляли собой неньютоновскую жидкость. Для описания динамических реологических свойств системы была задействована модель, позволяющая получить более реалистичные результаты моделирования. Затем эти динамические параметры были применены для моделирования. Наконец, смоделированное значение распределения давления может быть использовано для оценки экструдируемости материала. Чем выше значение моделируемого давления, тем сложнее экструдировать материал, что было доказано экспериментальными результатами. Смоделированное требуемое давление на поршне для печати испытанных гелей было самым высоким для геля бобов мунг и снижалось в порядке убывания для гелей из коричневого риса, гречихи, черного риса и семян бусенника (Иовлевы слезы). Эти результаты согласуются с результатами моделирования минимального напряжения потока и с результатами экспериментов по печати, подтверждая, что смоделированное давление поршня может быть использовано для оценки и прогнозирования простоты 3D-печати материала [89].

Для оценки эффективности 3D-печати пищевых продуктов используются и другие методы компьютерного моделирования.

Yang и соавторы исследовали влияние различных видов крахмала на эффективность печати геля с лимонным соком. Было смоделировано влияние различных свойств гелей и параметров процесса (вязкость исследуемого материала, время релаксации, объемный расход на входе и диаметр сопла) на изменение профиля скорости, сдвига и давления в проточном канале 3D-принтера с помощью программного обеспечения POLYFLOW. Данное ПО, основанное на методе конечных элементов (МКЭ), обладает мощными функциями для моделирования течения неньютоновских жидкостей и нелинейных потоков [90].

Целью исследования Jonkers и др. [91] являлось получение конститутивной модели, описывающей поведение материала в условиях большой деформации продуктов на основе крахмала, напечатанных на 3D-принтере. Чтобы количественно оценить различные аспекты механического поведения, проводится ряд экспериментов. Экспериментальная процедура, основанная на испытаниях на сжатие, позволяет оценивать внутренние механические свойства продуктов, напечатанных на 3D-принтере, и моделирует процессы их разрушения. 3D-модель структуры образцов учитывает высокую нелинейность, неупругую деформацию и деформационное поведение исследуемого материала. Важным ограничением представленной модели (учитывая процесс послойного производства продукта) является то, что свойства материала считаются изотропными. Модель реализована в рамках конечных элементов для идентификации параметров материала с учетом условий эксперимента. В этом исследовании методом конечных элементов на уровне образца учитывается влияние геометрии на механическую реакцию при приложении деформационного воздействия, включая деформацию до достижения напряжения разрушения [91].

Качество готовых напечатанных 3D-продуктов можно контролировать по точности соблюдения формы и размера, которая определяется степенью приближения напечатанной и сохраняемой формы продукта к заданной 3D-модели. Nijdam и соавторы [92] исследовали факторы, влияющие на стабильность размеров 3D-печатных пищевых структур. Они также рассмотрели возможность создания метода быстрого скрининга потенциальных пищевых чернил с использованием реологического теста для оценки их пригодности для 3D-печати. Ими предположено, что точность и стабильность структуры зависит от трех факторов [92]:

- рабочие параметры 3D-принтера, включая точность калибровки смещения, степень люфта систем моторного привода, а также способность принтера оказывать силу или давление, необходимые для выдавливания пищевых чернил заданной вязкости с желаемой скоростью потока;
- качество филамента (нити накала) — пластиковой нити, которая используется в 3D-принтерах для создания объектов методом послойного нанесения. Стабильность печатной структуры зависит от скорости сопла экструдера при его движении по поверхности печати относительно скорости выдавливания пищевых чернил из сопла;
- стабильность размеров, что зависит от того, обладают ли пищевые чернила механической жесткостью, чтобы противостоять гравитационной силе, которая деформирует формующую нить после экструзии и пищевую структуру во время и после печати.

С использованием метода размерного анализа и натурного эксперимента была исследована деформация цилиндров вязкоупругих пищевых чернил при размещении на плоской поверхности, деформирующихся под действием собственного веса. Представлен способ испытания пищевых чернил на предмет их способности формировать 3D-структуры достаточной жесткости. Для характеристики жесткости использовались модуль накопления и коэффициент демпфирования, полученные из амплитудной развертки при измерениях колебательного сдвига образцов цилиндров исследуемых пищевых чернил. Модуль накопления представлен безразмерным числом, выражающим отношение силы деформации от веса пищевой структуры к силе, противодействующей деформации за счет жесткости пищевых чернил. Это безразмерное число и коэффициент демпфирования образуют оси графика, которые формируют окно размерной стабильности. Оно основано на критерии, согласно которому пищевая структура должна деформироваться не более чем на 5 % в течение часа, чтобы считаться размерно-стабильной. Окно размерной стабильности позволяет подбирать пищевые чернила с оптимальной жесткостью, а также на основе реологических свойств чернил определять высоту структуры, обеспечивающую размерную стабильность 3D-продукта.

Оценить эффективность печати пищевых материалов при различных параметрах печати непросто из-за их сложного состава и изменчивых свойств. Различные типы гелей на водной основе можно рассматривать как простые эталонные модели для пищевых продуктов [21].

Так, был разработан метод систематической оценки качества печати пищевых продуктов с использованием гидроколлоидов как эталонного материала. На основе результатов оценки проведена классификация пищевых продуктов, которая может служить стандартом для выбора сырья для 3D-печати. Система классификации пригодности пищевых материалов для печати включает классы A, B, C и D, определенные по стабильности размеров и степени обработки. В качестве эталонного материала была использована метилцеллюлоза, и для проверки результатов моделирования были выбраны 12 видов пищевых продуктов с различными реологическими свойствами. Результаты экспериментов показали, что выбранные эталонные материалы могут полностью имитировать поведение при деформации и характеристики обработки реальных пищевых продуктов, а эффективность 3D-печати пищевых продуктов может быть оценена путем непосредственного сравнения с характеристиками эталонного материала [93].

Аналогичный подход был предложен Xu и соавторами в качестве эталонных модельных соединений использовался низкомолекулярный препарат индометацин. Препараты, смешанные с полимерами с различной растворимостью, использовались в качестве материалов для 3D-печати на основе экструзии. Анализ взаимосвязи механических и печатных свойств экструдированных нитей, а также определение их реологических параметров позволили разработать метод количественной оценки и прогнозирования печатных свойств нитей для 3D-печати методом плавленого осаждения [94].

Российскими учеными [95] предложен алгоритм автоматизированного контроля технологического процесса 3D-печати шоколадной массой. В качестве главного датчика предложено использование системы технического зрения, задача которой заключается в анализе и оценке состояния верхнего слоя печати. По результатам оценки верхнего слоя печати шоколада происходит управление скоростью нанесения материала следующего слоя.

Учитывая разнообразие пищевого сырья и сложность его состава, функционально-технологических, структурно-механических свойств и др. характеристик, необходимо разработать более совершенную технологию оценки их пригодности для 3D-печати пищевых продуктов, а результаты оценки могут быть использованы в качестве основы для выбора материалов или корректировки рецептуры продукта. Традиционные методы оценки часто не могут в полной мере отражать характеристики пищевых материалов. Методы оценки материалов для 3D-печати должны быть стандартизированы, чтобы соответствовать требованиям для оценки различных материалов, особенно с учетом того, что в процессе 3D-печати существует множество факторов, влияющих на характеристики материала, такие как температура, скорость, усилие сдвига и т. д. [21].

## 7. Преимущества и ограничения при 3D-печати продуктов питания

У каждой технологии есть свои плюсы и минусы, и 3D-печать продуктов питания не является исключением [96].

3D-печать продуктов питания представляет собой значительный шаг вперед в области пищевых технологий.

Наиболее важным преимуществом технологии 3D-печати является возможность индивидуального проектирования продуктов питания, как по форме, так и по содержанию питательных веществ. При этом расширяется потенциал персонализации, что дает возможность беспрецедентно настраивать форму, текстуру и питательную ценность продуктов. Это позволяет создавать персонализированные диеты, которые могут принести пользу здоровью и в то же время снизить спрос на продукты с высокой степенью переработки, способствуя продовольственной устойчивости [2].

Технология 3D-печати позволяет точно контролировать рацион питания и обеспечивать удовлетворение потребностей и предпочтений потребителей, страдающих пищевой непереносимостью. Даже пищевые ингредиенты с известными свойствами требуют адаптации к конкретным рецептурам с учетом технологических процессов производства. Еще одно преимущество 3D-печати продуктов питания заключается в упрощении, гибкости и сокращении цепочек поставок. Также есть возможность использовать альтернативные материалы, такие как грибы и водоросли, которые богаты питательными веществами, но не поддаются обработке традиционными методами. Кроме того, пищевые 3D-принтеры позволяют создавать художественные блюда в высокой кухне и способствуют массовой кастомизации в промышленном кулинарном секторе [97].

Несмотря на многообещающий потенциал 3D-печати продуктов питания, существует ряд проблем, препятствующих ее широкому внедрению, в частности из-за ограниченной доступности подходящих для использования материалов [1].

Пищевые материалы, используемые для 3D-печати на основе экструзии, можно разделить на три категории [17]. Во-первых, это материалы, пригодные для печати, такие как шоколад, сыр и глазурь для тортов, которые обладают отличными печатными свойствами и плавно выдавливаются во время печати. Во-вторых — традиционные пищевые материалы, такие как овощи, мясо, яйца, рыба и фрукты, которые не поддаются печати по своей природе и требуют предварительной обработки для улучшения их пригодности к печати для гладкой экструзии во время печати. Эти материалы являются основными блюдами и употребляются ежедневно. И третья группа — альтернативные ингредиенты, которые включают в себя новые источники белка и клетчатки, такие как морские водоросли (морская капуста, нори или вакаме), микроводоросли (пресноводные и морские микроорганизмы, состоящие из одной клетки), насекомые и грибы, которые являются устойчивой заменой основным продуктам питания [1].

Использование каждой из указанных выше категорий продуктов для 3D-печати создает проблемы и возможности в достижении необходимых реологических свойств смесей и в подборе ассортимента пригодных продуктов. Требуется комплекс исследований для разработки оптимальных режимов печати. Кроме того, одной из ключевых проблем является сложность контроля вкуса, текстуры и цвета печатной продукции.

В настоящее время большинство пищевых ингредиентов необходимо хранить в сухом виде и преобразовать в пасту перед печатью, а процесс печати пищевых материалов намного сложнее с технической точки зрения, чем печать пластика или металлов. Кроме того, следует отметить дороговизну пищевых 3D-принтеров.

Еще одна проблема, стоящая перед коммерческой 3D-печатью продуктов питания, — это эффективность производства. Медленная скорость 3D-печати может замедлить массовое производство. Скорость печати или диаметр сопла могут быть увеличены, но при частом выполнении операции разрешение и точность печати могут снизиться. Поэтому этот вариант следует использовать только в том случае, если можно сохранить точность печати. В качестве альтернативы исследователи предложили использовать адаптивные алгоритмы для ускорения печати за счет регулировки параметров печати, которые уравновешивают время печати и ее качество. Производство нескольких изделий одновременно с помощью принтера с несколькими соплами — еще одна возможная стратегия повышения эффективности 3D-печати. В настоящее время эта функция недоступна в промышленных принтерах, и нелегко создать доступные и надежные принтеры, которые могут быстро и качественно производить продукцию [98].

Еще одним из ограничений для массовой 3D-печати является размер предметов, которые могут быть изготовлены. Размер печатаемого объекта определяется размерами принтера и печатного стола и часто ограничивается стоимостью, пространством производственного помещения и требованиями к мощности. Кроме того, печать продукта большого размера может занять больше времени и потребовать больше материала, что увеличивает затраты и вероятность

появления неточностей в соблюдении размера и формы. Некоторые 3D-принтеры позволяют печатать большое количество предметов по частям, а затем собирать их, но это может поставить под угрозу сохранение структуры и эстетики готового изделия [99].

Важным препятствием для внедрения этих технологий является ограниченное регулирование и изучение рисков безопасности, связанных с 3D-печатью. Технические проблемы 3D-печати пищевых продуктов и безопасность 3D-печатных продуктов были упомянуты во многих обзорных исследованиях [2,69,100–102]. Исследования показывают, что необходимо проведение дополнительных работ, направленных на определение способов минимизации потенциальных опасностей. Последние не ограничиваются образованием теплогенерирующих соединений, микробиологическими и физическими рисками, которые могут представлять угрозу для здоровья людей и приводить к возникновению опасных техногенных инцидентов [5]. Кроме того, интенсификация автоматизации, связанная с 3D-печатью продуктов питания, может оказать влияние на традиционный труд в пищевой промышленности, создавая социальные и экономические проблемы [2].

Поскольку большинство напечатанных на 3D-принтере пищевых продуктов являются пастами, срок их годности достаточно ограничен. Например, реологические свойства теста, подготовленного для 3D-печати, начинают изменяться через 2 часа после его изготовления. Большинство процессов 3D-печати продуктов питания включают нагрев в процессе экструзии и охлаждение после осаждения. Процессы нагрева и охлаждения или повторного нагрева могут способствовать росту микроорганизмов и влиять на безопасность пищевых продуктов. Кроме того, существует прямой контакт между рабочими частями принтера (например, соплами, лотками) и сырьем для приготовления пищевого продукта. Severini и др. [103] в исследовании морфологических и микроструктурных свойств фруктовых и овощных смузи, полученных технологией 3D-печати, обнаружили присутствие психрофильных, мезофильных и дрожжевых микроорганизмов концентрацией 4,27, 5,02 и 4,23 log КОЕ/г соответственно. Эти высокие значения подразумевают, что контактное взаимодействие между пищевыми чернилами и рабочими механизмами принтера в процессе 3D-печати увеличивает микробное загрязнение. Также ряд исследований показал, что большинство настольных принтеров сделаны из пластика и могут выделять его ультратонкие частицы. Такие токсичные частицы могут выделяться в процессе печати и вызывать неблагоприятные последствия для здоровья. Большинство исследователей считают, что проблемы безопасности 3D-печатных продуктов питания будут преодолены. Тем не менее, опасения по поводу безопасности 3D-печатных продуктов питания могут замедлить развитие этой технологии. Кроме того, в настоящее время отсутствуют национальные, региональные или международные обязательные стандарты специально для 3D-печатных продуктов питания, что может привести к тому, что напечатанные на 3D-принтере продукты не будут использоваться в диетотерапии [69].

Очередная угроза для развития 3D-печати — быстрый прогресс в других областях пищевых технологий: на рынке могут появиться более эффективные или привлекательные альтернативы, особенно с учетом низкой доступности 3D-биопечати для малого бизнеса [2].

## 8. Восприятие потребителями и приемлемость пищевых продуктов, напечатанных на 3D-принтере

Приемлемость продуктов, напечатанных на 3D-принтере, до сих пор остается проблемной. Исследование, проведенное Lupton и соавторами [104], показало обеспокоенность значительного числа австралийских участников (всего было опрошено 30 человек) возможностью появления «напечатанных» продуктов. Во-первых, по мнению респондентов, пища, напечатанная на 3D-принтере, может быть несъедобной, небезопасной или ненатуральной. Во-вторых, технология трансформирует понятие пищи, вводя новые методы приготовления и обработки съедобных ингредиентов. Все участники дискуссии ассоциировали термин «принтер» с непищевой промышленностью.

Исследование среди 1045 ирландцев об отношении потребителей к использованию технологий 3D-печати продуктов питания [105] установило, что принятие или неприятие продуктов, напечатанных на 3D-принтере, зависит от: 1) предоставленной первоначальной информации, т. е. первого впечатления; 2) хорошо продуманной коммуникации. Неофобия пищевых технологий препятствует принятию 3D-печатных пищевых продуктов и готовности потребителей их пробовать.

Результаты онлайн-опроса австралийской дискуссионной группы [106], направленного на обсуждение отношения к новой технологии — 3D-печати пищевых продуктов, показали, что участники признают потенциальную пользу для общества печатных продуктов питания на основе насекомых и культивируемого мяса. Однако их приоритеты в выборе продуктов питания больше сосредоточены на традиционных, натуральных, «здоровых» и вкусных. Лишь немногие участники выразили заинтересованность или поддержку идеи употребления напечатанных на 3D-принтере пищевых продуктов, изготовленных из культивированного мяса или насекомых. Большинство выразили свое беспокойство по поводу степени переработки культивируемого мяса, а также антипатию к идее употребления в пищу печатной продукции, содержащей насекомых.

В работе [107] опубликовано исследование о восприятии потребителями продуктов, напечатанных на 3D-принтере. На основании результатов опроса было сформировано три кластера. Кластер № 1 ($n$ = 140) — с ярко выраженным интересом, кластер № 2 ($n$ = 98) — с умеренным интересом, кластер № 3 ($n$ = 91) без интереса. Участники первого кластера проявляли интерес к 3D-печатным пищевым продуктам, считая, что технология снизит стоимость продуктов питания и принесет пользу в будущем. Участники второго кластера выражали готовность пробовать такие продукты, тогда как третий кластер считал их неприемлемыми и небезопасными для потребления.

В исследованиях, рассматривающих отношение потребителей и специалистов с опытом работы в области питания и разработки продуктов питания к 3D-печатным продуктам, отмечено, что опрошенные были обеспокоены питательными качествами 3D-печатных продуктов питания и считали, что технология 3D-печати продуктов питания может нарушить первоначальную пищевую ценность продуктов [1], так как отмечено, что процессы, связанные с 3D-печатью продуктов питания и постобработкой (приготовление на пару, выпечкой и другие виды тепловой обработки) 3D-печатной пищи, могут повлиять на пищевую ценность [108]. Во время печати и последующей обработки происходят многие химические реакции и физические изменения (такие как денатурация белка, желатинизация и фрагментация крахмала, а также уменьшение влажности, усушка), которые могут повлиять на пищевую ценность конечного продукта [108,109]. Martínez-Monzó и соавторы [108] сравнили концентрацию ацетата витамина Е в арахисовом масле до и после 3D-печати, а также после 3D-печати и термической постобработки, и показали, что процесс экструзии при 3D-печати способствовал небольшому снижению ацетата витамина Е, но термическая обработка привела к значительному снижению концентрации ацетата витамина Е.

Технологии предварительной обработки (дробление, гелеобразование) пищевого материала, предназначенного для печати на 3D-принтере, могут изменить пищевую структуру и исказить пищевую матрицу [110]. Потеря естественного матрикса в результате переработки может повлиять на высвобождение, трансформацию и последующую абсорбцию определенных питательных веществ в желудочно-кишечном тракте [111].

Работа [112] посвящена причинам возникновения страха перед использованием инноваций в пищевой промышленности, в том числе и перед внедрением 3D-технологий. Автор отмечает, что использование 3D-печати в пищевой промышленности — это переход к цифровой трансформации пищевых систем, что вызывает беспокойство потребителей. На основании анализа публикаций по теме 3D-печати пищевых продуктов автор делает вывод, что принятие инновационных технологий зависит от осведомленности людей об используемой технологии и ее преимуществах.

## 9. Вклад 3D-печати в достижение «Целей устойчивого развития» (ЦУР)

Технологические, ресурсные и промышленные аспекты 3D-печати продуктов питания имеют потенциал, позволяющий «печатать» продукты питания с высокой степенью индивидуализации, не только по форме, но и по структуре, текстуре, вкусу, питательной ценности, с новыми пищевыми ингредиентами и по специальным рецептурам для разных потребителей. Растущее значение глобальных проблем подталкивает к рассмотрению вопроса о том, может ли способ производства напечатанного продукта и 3D-печати быть устойчивым — и каким образом.

Технология 3D-печати продуктов оказывает достаточное влияние на устойчивое развитие благодаря своей способности достигать некоторых из 17 целей устойчивого развития (ЦУР), включая возможность использования пищевых отходов, развитие системы персонализированного питания и изготовление индивидуальных форм продуктов. Кроме того, развитие данной технологии улучшает имидж пищевой промышленности путем выявления ее текущих проблем и ограничений, а также устойчивого вклада, который способствует созданию пищевых продуктов для профилактики заболеваний.

Alami и соавторы оценили влияние 3D-печати продуктов на успешное достижение девяти ЦУР, а именно ЦУР 1, ЦУР 2, ЦУР 3, ЦУР 7, ЦУР 8, ЦУР 11, ЦУР 12, ЦУР 13, ЦУР 17 из общего числа ЦУР, установленных Организацией Объединенных Наций [5].

ЦУР 1 призывает к искоренению нищеты во всех ее формах к 2030 году. Часть проблем, стоящих перед миром, проистекает из неспособности производить достаточное количество продовольствия для всех групп населения по доступной цене. Ожидается, что в будущем показатель недоедания увеличится в связи с повышением численности населения мира. Alami и соавторы [5] полагают, что 3D-печать продуктов питания может конкурировать с традиционным производством продуктов питания, увеличивая объемы продовольствия для обеспечения населения, особенно насыщая рынок Азиатско-Тихоокеанского региона. Применение 3D-печати значительно снижает затраты на закупку комплектующих и расходных материалов. Это также позволяет проводить менее дорогой и простой ремонт благодаря локализованному и недорогому производству запасных частей [5].

ЦУР 2 направлена на искоренение голода, обеспечение доступа к продовольствию для всех групп населения, на улучшение продовольственного питания и продвижение устойчивых методов ведения сельского хозяйства. Глобальный голод — это проблема, связанная с доступностью продовольствия, изменением климата, стихийными бедствиями и с другими проблемами, которые могут повлиять на поставки и распределение продовольствия. Технология 3D-печати пищевых продуктов может поспособствовать решению проблемы глобальной продовольственной безопасности: она позволяет использовать альтернативные источники белка, такие как овощи, насекомые и водоросли, снижая зависимость от животных белков [5]. Кроме того, технология поддерживает применение растений с высоким содержанием клетчатки, включая дикорастущие, для создания более здоровых пищевых продуктов.

ЦУР 3. До пандемии COVID-19 был достигнут значительный прогресс в улучшении здоровья многих людей. Тем не менее, по-прежнему существует необходимость в дополнительных усилиях для полной ликвидации распространения болезней и решения всех проблем здравоохранения. Основная цель ЦУР 3 заключается в том, чтобы гарантировать здоровый образ жизни и содействовать благополучию людей всех возрастов. Кроме того, в ЦУР 3 подчеркивается необходимость активизации научных исследований и разработок, увеличения финансирования здравоохранения и расширения возможностей в области снижения и управления рисками для здоровья населения всех стран. 3D-печать продуктов питания имеет потенциал для точного управления рационом питания людей, преобразуя их потребности в питательных и энергетических продуктах в цифровой формат, который затем может быть настроен в зависимости от их физического состояния, уровня здоровья и с учетом конкретных пищевых потребностей. Концепция печати персонализированных продуктов питания способна решить проблемы недоедания и значительно улучшить общее состояние здоровья и самочувствие [5]. 3D-печать продуктов питания позволяет обогащать продукты необходимыми витаминами и минеральными веществами. Она может помочь контролировать размер порций и калорийность, способствуя снижению числа заболеваний, связанных с питанием, таких как ожирение и диабет [2].

ЦУР 7. Основной задачей ЦУР 7 является поддержка доступной, устойчивой и современной энергетики. 3D-печать продуктов питания напрямую связана с ЦУР 7. Снижение требований к вводу и выводу 3D-печати продуктов питания в отраслях с высокой добавленной стоимостью может привести к снижению потребления энергии и к сокращению концентрации углеродного следа в атмосфере. Еще одним преимуществом применения / широкого внедрения 3D-печати является снижение затрат на рабочую силу, так как 3D-производство продуктов питания на сегодняшний день не требует привлечения высокопрофессиональных сотрудников. Усовершенствование принтеров, разумная организация деятельности, оптимизация цепочки поставок и снижение логистических затрат — все это может помочь повысить устойчивость применения 3D-печати [5].

ЦУР 8 направлена на достижение инклюзивного и устойчивого экономического роста, а также на обеспечение возможностей трудоустройства. По прогнозам аналитиков компании Emergen Research, сектор 3D-печати пищевых продуктов значительно вырастет, достигнув стоимости около 342,52 миллиардов долларов к 2027 году[27]. На мировом рынке 3D-печати продуктов питания в основном доминирует Северная Америка, на долю которой приходится примерно 36 % рынка. За ней следует Европа с 31 % доли рынка, в то время как Азиатско-Тихоокеанский регион занимает 22 % рынка. Кроме того, технология 3D-печати пищевых продуктов позволяет производить альтернативные источники пищи, такие как растительное мясо, блюда из водорослей или насекомых в привлекательных формах и вкусах, способствуя общественному признанию и ее распространению, а также выходу пищевой промышленности на новые рынки. Дальнейшее развитие и совершенствование 3D-технологий продуктов питания потребует привлечения высококвалифицированных сотрудников для полного использования ее потенциала. В результате 3D-печать продуктов питания может значительно изменить бизнес-модели, повлиять на мировую экономику и трансформировать существующие цепочки поставок [5].

ЦУР 11 призывает к устойчивому развитию городов и населенных пунктов. Несмотря на некоторые достижения, достигнутые в рамках проектов «умных городов», города потребляют 80 % ресурсов Земли. В связи с этим использование передовых технологий в городском производстве продуктов питания может повысить эффективность пищевой цепочки в области поставок, переработки и распределения, а также логистики и управления пищевыми отходами за счет использования принципов Четвертой промышленной революции. Технология 3D-печати может преобразовать пищевую промышленность, позволяя потребителям создавать продукты с заданными формой, текстурой, цветом, вкусом и диетическими свойствами [5]. Такая гибкость, соответствующая стандартам экологической безопасности и качества пищевых продуктов, повышает доступность высококачественных готовых блюд для городских жителей.

ЦУР 12. По оценкам экспертов[28], во всем мире потери или порча продовольствия составляют около 1,3 миллиарда тонн продовольствия по всей цепочке поставок. Это количество составляет треть от общего объема имеющегося продовольствия. В результате одной из наиболее актуальных мировых проблем является согласование экологических целей с экономическими целями для предотвращения ухудшения состояния окружающей среды. Устойчивые модели потребления и производства способствуют переходу к экологичной и социально инклюзивной глобальной экономике. Для этого необходимы стратегии оптимизации использования ресурсов и снижения экологического воздействия. Эти стратегии предполагают сокращение использования природных ресурсов при одновременной минимизации воздействия экономической деятельности на окружающую среду. ЦУР 12 направлена на обеспечение устойчивых моделей потребления и производства и включает в себя задачи по повышению эффективности использования ресурсов, сокращению отходов и загрязнения, а также поощрению устойчивых практик по всей цепочке поставок [5].

3D-печать способствует эффективному использованию съедобных ингредиентов. Точное количество необходимых ингредиентов рассчитывается 3D-принтером по заранее спланированному рецепту. 3D-печать продуктов питания позволяет производить продукты питания по требованию, снижая потребность в хранении. Эта технология способствует улучшению контроля качества пищи, минимизации отходов за счет эффективного использования ингредиентов и расширению ассортимента персонализированных пищевых продуктов [4].

Трехмерная печать может повысить эффективность использования продуктов питания и сократить пищевые отходы за счет использования деформированных овощей и фруктов, которые не соответствуют критериям продажи, или побочных продуктов животного происхождения для получения более приемлемых для потребителей пищевых продуктов [69].

Технология 3D-печати продуктов питания может предложить творческие решения для повторного использования различных пищевых отходов и побочных продуктов. Эта технология способна превращать эти материалы в полезные и ценные продукты. Это позволяет расширить ассортимент выпускаемой пищевой продукции и, следовательно, может выступить как фактор сокращения голода в мире. Некоторые из этих пищевых отходов включают сырье и продукты, богатые пребиотиками и пищевыми волокнами, которые известны своей пользой для здоровья [113].

Jagdishwaran и соавторы [114] исследовали применение виноградных выжимок и пшеничной дробины — отходов, обычно используемых в кормлении животных, — как ключевых ингредиентов для 3D-печати функционального печенья. Использование виноградных выжимок повышает питательную ценность и антиоксидантные свойства печенья. Печать с использованием сопла диаметром

[27] Отчет об анализе размера, доли и тенденций мирового рынка 3D-печати продуктов питания — обзор отрасли и прогноз до 2032 года. Retrieved from https://www.databridgemarketresearch.com/ru/reports/global-3d-food-printing-market Accessed February 20, 2025.

[28] World Health Organization. (2024). Food safety. Retrieved from https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/food-safety. World Health Organization, Geneva, Switzerland. Accessed February 20, 2025.

1,28 мм, при скорости вращения двигателя экструдера 600 об/мин и скорости печати 400 мм/мин обеспечила оптимальную производительность пищевого 3D-принтера CARK собственной разработки авторов. Напечатанные образцы были подвергнуты последующей обработке при температуре 130 °C в течение 12 минут, и при органолептической оценке наибольшее предпочтение было отдано рецептуре с использованием 6% виноградных выжимок. Разработанный продукт был богат белками, пищевыми волокнами и целым рядом биологически активных компонентов. Такой подход подчеркивает потенциал использования отходов с учетом положительных потребительских предпочтений. Таким образом, аддитивное производство демонстрирует индивидуализацию производства пищевых продуктов с точки зрения их питательной ценности, обеспечивая при этом возможности для более чистых методов производства и для получения дополнительных пищевых ресурсов из побочного сырья пищевой промышленности.

3D-печать может быть использована для создания биоразлагаемой упаковки из сельскохозяйственных пищевых отходов. Например, Nida и соавторы показали, что добавление гуаровой камеди в непечатаемую рисовую шелуху создает напечатанные на 3D-принтере коробки для хранения продуктов [32].

В целом, 3D-печать рассматривается как экологически чистый производственный процесс, который обеспечивает значительные экологические преимущества благодаря трем основным факторам: эффективному использованию ресурсов, эффективному обращению с отходами и регулированию уровня загрязнения. По сравнению с обычными процессами производства продуктов питания, количество пищевых отходов, производимых при 3D-печати продуктов питания, минимально. Это связано с тем, что 3D-принтер рассчитывает и использует точное количество ингредиентов в соответствии с заранее определенным рецептом. Кроме того, 3D-печать продуктов питания обеспечивает воспроизводимость продуктов питания, что означает, что те же ингредиенты могут быть повторно использованы для создания аналогичного пищевого продукта. Таким образом, 3D-печать продуктов питания имеет потенциал для продвижения устойчивого развития в производстве продуктов питания [5].

ЦУР 13 направлена на недопущение повышения глобальной температуры больше чем на 2 °C, что будет иметь серьезные последствия для экосистемы планеты. Метан и закись азота являются основными парниковыми газами, выбрасываемыми в результате животноводства, и считаются наиболее значительными факторами, способствующими изменению климата. По сравнению с традиционными процессами производства продуктов питания, 3D-печать позволяет производить продукты питания без выбросов вредных загрязняющих веществ в окружающую среду. Более того, эта технология значительно изменила цепочку поставок продуктов питания, устранив несколько этапов и повысив ее оперативность, сокращая время и расстояние между спросом и предложением по сравнению с традиционными методами производства и доставки продуктов питания. В результате 3D-печать продуктов питания снижает углеродный след производства продуктов питания [5].

ЦУР 17 направлена на совершенствование путей реализации всей повестки ЦУР и содействие международному сотрудничеству. 3D-печать продуктов питания напрямую способствует достижению ЦУР 17 и выполнению ее задач. Пищевой сектор является хорошо развитой отраслью со значительным глобальным экономическим значением. На его долю приходится более 4 триллионов долларов США в год. Исследователи отмечают, что потенциал для внедрения инноваций в промышленность путем партнерства с различными сторонами и применения наиболее подходящих методов (т. е. планирования и бизнес-моделей) для коммерциализации новых продуктов может повысить вероятность их выхода на рынок [5].

## 10. Заключение

Аддитивные технологии, включая 3D-печать, уже начинают трансформировать пищевую промышленность, а в будущем их влияние может стать еще более значительным.

Ключевые аспекты применения аддитивных технологий в настоящее время включают: (1) персонализированное питание: создание продуктов с учетом индивидуальных потребностей (например, печать протеиновых батончиков с точным составом макронутриентов); (2) фуд-дизайн и презентация блюд: рестораны высокой кухни используют 3D-печать для создания сложных десертов, украшений и нестандартных форм (например, шоколадные фигуры, «напечатанные» суши или паста необычной формы); (3) альтернативные источники белка: печать продуктов из насекомых, растительных заменителей мяса или культивируемых клеток (например, стартапы печатают «мясо» из растительных компонентов); (4) специализированные рационы для космических миссий и военных операций: NASA и ESA исследуют 3D-печать еды для длительных космических миссий (например, печать пиццы на МКС).

В будущем возможны следующие перспективы применения аддитивных технологий: (1) массовая кастомизация продуктов: супермаркеты и фудтех-стартапы смогут предлагать «печать на заказ» с учетом вкусов и диетических ограничений покупателя; (2) устойчивое производство: снижение пищевых отходов за счет точного дозирования ингредиентов; использование местных и альтернативных источников белка (водоросли, грибы, насекомые); (3) автоматизация и роботизация кухонь: 3D-принтеры в сочетании с ИИ смогут готовить сложные блюда автоматически (например, в ресторанах или дома); (4) медицинское питание: печать продуктов для людей с дисфагией (нарушениями глотания) или специфическими медицинскими потребностями.

Потенциал 3D-печати продуктов питания подчеркивается также тем, что она может внести значительный вклад в достижение контрольных показателей устойчивого развития, установленных Организацией Объединенных Наций.

Однако на данном этапе производства существует ряд технологических вызовов: (1) скорость и масштабируемость: 3D-печать еды медленнее традиционного производства; (2) стоимость: оборудование и ингредиенты (например, пищевые чернила) остаются дорогостоящими; (3) регулирование: необходимы стандарты безопасности для новых пищевых технологий, то есть 3D-печать в пищевой промышленности пока находится на раннем этапе, но в перспективе она может революционизировать, сделав производство еды более персонализированным, устойчивым и инновационным.

Таким образом, технология 3D-печати пищевых продуктов позволяет создавать персонализированные продукты, соответствующие индивидуальным диетическим потребностям, для улучшения здоровья. Она также способствует снижению выбросов парниковых газов и поддерживает экологически устойчивое производство.

Систематические исследования и разработки будут иметь решающее значение для преодоления препятствий и для раскрытия всего потенциала 3D-печати в пищевой промышленности.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / REFERENCES


1. Pereira, T., Barroso, S., Gil, M. M. (2021). Food texture design by 3D printing: A review. *Foods*, 10, Article 320. https://doi.org/10.3390/foods10020320
2. Millán, M. G. D., de la Torre, M. G. M. V. (2024). 3D food printing: Technological advances, personalization and future challenges in the food industry. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 37, Article 100963. https://doi.org/10.1016/j.ijgfs.2024.100963
3. Dictionary Merriam-Webster (2022). Retrieved from https://www.merriam-webster.com/dictionary/3D%20printing/ Accessed March 27, 2025.
4. Rinshana, P. F., Murugesan, B., Kim, Y. H., Alaguthevar, R., Rhim, J.-W. (2025). Advances in 3D food printing technology: Innovation and applications in the food industry. *Food Science and Biotechnology*, 34, 403–421. https://doi.org/10.1007/s10068-024-01779-7
5. Alami, A. H., Olabi, A. G., Khuri, S., Aljaghoub, H., Alasad, S., Ramadan, M. et al. (2024). 3D printing in the food industry: Recent progress and role in achieving sustainable development goals. *Ain Shams Engineering Journal*, 15(2), Article 102386. https://doi.org/10.1016/j.asej.2023.102386
6. Waseema, M., Tahira, A. U., Majeed Y. (2023). Printing the future of food: The physics perspective on 3D food printing. *Food Physics*, 1, Article 100003. https://doi.org/10.1016/j.foodp.2023.100003
7. Godoi, F. C., Prakash, S., Bhandari, B. R. (2016). 3d printing technologies applied for food design: Status and prospects. *Journal of Food Engineering*, 179, 44–54. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2016.01.025
8. Ramachandraiah, K. (2021) Potential development of sustainable 3d-printed meat analogues: A review. *Sustainability*, 13(2), Article 938. https://doi.org/10.3390/su13020938
9. Polaris Market Research (2022). 3D Food Printing Market Share, Size, Trends, Industry Analysis Report. Retrieved from https://www.polarismarketresearch.com/industry-analysis/3d-food-printing-market Accessed February 20, 2025.
10. Коноваленко, Л. Ю., Мишуров, Н. П., Голубев, И. Г., Никитина, М. А., Бредихин, С. А. (2020). Цифровая трансформация пищевой и перерабатывающей промышленности: аналит. Обзор. Москва: Издательство «Росинформагротех», 2020. [Konovalenko, L. Yu., Mishurov, N. P., Golubev, I. G., Nikitina, M. A. (2020). Digital transformation of food and processing industry: An analytical review. Moscow: Rosinfomagrotech, 2020. (In Russian)]
11. Hull, Ch. “Apparatus for Production of Three-Dimensional Objects by Stereolithography”, U. S. Patent 4,575,330, published March 11, 1986.
12. Deckard, C. “Method and apparatus for producing parts by selective sintering”, U. S. Patent 4,863,538, filed October 17, 1986, published September 5, 1989.

13. Feygin, M. "Apparatus and method for forming an integral object from laminations" patent 4,752,352 US № 07/040361 filed April 17, 1987, published June 21, 1988.
14. Crump, S. S. "Apparatus and method for creating three-dimensional objects" patent 5,121,329 US № 07/429012 filed October 30, 1989, published June 9, 1992.
15. Sachs, E., Cima, M., Williams, P., Brancazio, D., Cornie, J. (1992). Three dimensional printing: Rapid tooling and prototypes directly from a CAD model. *Journal of Engineering for Industry*, 114(4), Article 481. https://doi.org/10.1115/1.2900701
16. Sachs E., Haggerty J., Cima M., Williams. P. "Three-dimensional printing techniques" patent 5,204,055 US № 07/447677 filed December 8, 1989, published April 20, 1993.
17. Wilson, A., Anukiruthika, T., Moses, J. A., Anandharamakrishnan, C. (2020). Customized shapes for chicken meat–based products: Feasibility study on 3D-printed nuggets. *Food and Bioprocess Technology*, 13(11), 1968–1983. https://doi.org/10.1007/s11947-020-02537-3
18. Wilson, A., Anukiruthika, T., Moses, J. A., Anandharamakrishnan, C. (2023). Preparation of fiber-enriched chicken meat constructs using 3D printing. *Journal of Culinary Science and Technology*, 21(1), 127–138. https://doi.org/10.1080/15428052.2021.1901817
19. Enfield, R. E., Pandya, J. K., Lu, J., McClements, D. J., Kinchla, A. J. (2022). The future of 3D food printing: Opportunities for space applications. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 63(29), 10079–10092. https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2077299
20. Bulut, E. G., Candoğan, K. (2022). Development and characterization of a 3D printed functional chicken meat based snack: Optimization of process parameters and gelatin level. *LWT*, 154, Article 112768. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112768
21. Jiang, Q. Y., Zhang, M., Mujumdar, A. S. (2021). Novel evaluation technology for the demand characteristics of 3D food printing materials: A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 62(3), 4669–4683. https://doi.org/10.1080/10408398.2021.1878099
22. Molimi, M. B., Egan, P., Adeb, O. A. (2025) Progress in three-dimensional (3D) printed foods for dysphagia patients: Food sources, processing techniques, printability, nutrition, acceptability, and safety aspects. *Food Research International*, 202, Article 115629. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2024.115629
23. Бредихин С. А., Антипов С. Т., Андреев В. Н., Мартеха А. Н. (2021). Влияние реологических характеристик на качество 3Д-печати пищевых паст. *Вестник ВГУИТ*, 83 (2), 40–47. [Bredihin, S. A., Antipov, S. T., Andreev, V. N., Martekha, A. N. (2021). Influence of rheological characteristics on the quality of 3D printing of food pastes. *Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies*, 83(2), 40–47. (In Russian)] https://doi.org/10.20914/2310-1202-2021-2-40-47
24. Lorenz, T., Iskandar, M. M., Baeghbali, V., Ngadi, M. O., Kubow, S. (2022). 3D food printing applications related to dysphagia: A narrative review. *Foods*, 11(12), Article 1789. https://doi.org/10.3390/foods11121789
25. Wen, Y., Chao, C., Che, Q. T., Kim, H. W., Park, H. J. (2023). Development of plant-based meat analogs using 3D printing: Status and opportunities. *Trends in Food Science and Technology*, 132, 76–92. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2022.12.010
26. Yuliarti, O., Ng, L., Koh, W. M., Abdullah Tan, M. F. B. M. F., Sentana, A. D. (2023). Structural properties of meat analogue with added konjac gels. *Food Hydrocolloids*, 142, Article 108716. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2023.108716
27. Guo, Z., Arslan, M., Li, Z., Cen, S., Shi, J., Huang, X. et al. (2022). Application of protein in extrusion-based 3D food printing: Current status and prospectus. *Foods*, 11(13), Article 1902. https://doi.org/10.3390/foods11131902
28. Chen, Y., McClements, D. J., Peng, X., Chen, L., Xu, Z., Meng, M. et al. (2022). Starch as edible ink in 3D printing for food applications: A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 64(3), 456–471. https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2106546
29. Zhong, Yu., Wang, B., Lv, W., Wu, Yi., Lv, Yi, Sheng, S. (2024). Recent research and applications in lipid-based food and lipid-incorporated bioink for 3D printing. *Food Chemistry*, 458, Article 140294. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.140294
30. Bhat, Z. F., Morton, J. D., Kumar, S., Bhat, H. F., Aadil, R. M., Bekhit A.-E.-D.-A. (2021). 3D printing: Development of animal products and special foods. *Trends in Food Science and Technology*, 118(Part A), 87–105. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.09.020
31. Chen, J., Rosenthal A. (2015) Food texture and structure. Chapter in a book: Modifying Food Texture. Woodhead Publishing, 2015. https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-333-1.00001-2
32. Nida, S., Anukiruthika, T., Moses, J. A., Anandharamakrishnan, C. (2020). 3D printing of grinding and milling fractions of rice husk. *Waste Biomass Valorization*, 12(1), 81–90. https://doi.org/10.1007/s12649-020-01000-w
33. Scheele, S. C., Hoque, M. N., Christopher, G., Egan, P. F. (August 17–19, 2021). *Printability and fidelity of protein-enriched 3d printed foods: A case study using cricket and pea protein powder*. International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference. https://doi.org/10.1115/detc2021-67783
34. Liu, Y., Liu, D., Wei, G., Ma, Y., Bhandari, B., Zhou, P. (2018). 3D printed milk protein food simulant: Improving the printing performance of milk protein concentration by incorporating whey protein isolate. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 49, 116–126. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2018.07.018
35. Anukiruthika, T., Moses, J. A., Anandharamakrishnan, C. (2020). 3D printing of egg yolk and white with rice flour blends. *Journal of Food Engineering*, 265, Article 109691. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.109691
36. Montoya, J., Medina, J., Molina, A., Gutiérrez, J., Rodríguez, B., Marín, R. (2021). Impact of viscoelastic and structural properties from starch-mango and starch-arabinoxylans hydrocolloids in 3D food printing. *Additive Manufacturing*, 39(2), Article 101891. https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.101891
37. Cheng, Y., Wang, B., Li, B., Li, G., Zhong, Yu., Lv, W., Xiao, H. (2025). Modifed Starch-Based Emulsion-Filled Gels for 3D Printing: Preparation, Characterization, and Printability. *Food and Bioprocess Technology*, 18, 3732–3746. https://doi.org/10.1007/s11947-024-03669-6
38. Carvajal-Mena, N., Tabilo-Munizaga, G., Perez-Won, M., Lemus-Mondaca, R. (2022). Valorization of salmon industry by-products: Evaluation of salmon skin gelatin as a biomaterial suitable for 3D food printing. *LWT*, 155, Article 112931. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112931
39. Chen, J., Mu, T., Goffin, D., Blecker, C., Gaëtan, R., Richel, A. et al. (2019). Application of soy protein isolate and hydrocolloids based mixtures as promising food material in 3D food printing. *Journal of Food Engineering*, 261, 76–86. https://doi.org/10.1016/J.jfoodeng.2019.03.016
40. Mu, R., Wang, B., Lv, W., Yu, J., Li, G. (2023). Improvement of extrudability and selfsupport of emulsion-filled starch gel for 3D printing: Increasing oil content. *Carbohydrate Polymers*, 301(Part 1), Article 120293. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2022.120293
41. You, S., Huang, Q., Lu, X. (2023). Development of fat-reduced 3D printed chocolate by substituting cocoa butter with water-in-oil emulsions. *Food Hydrocolloids*, 135, Article 108114. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2022.108114
42. Ross, M. M., Crowley, S. V., Crotty, S., Oliveira, J., Morrison, A. P., Kelly, A. L. (2021). Parameters affecting the printability of 3D-printed processed cheese. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 72, Article 102730. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2021.102730
43. Domzalska, Z., Jakubczyk, E. (2025) Characteristics of food printing inks and their impact on selected product properties. *Foods*, 14(3), Article 393. https://doi.org/10.3390/foods14030393
44. Dong, H., Wang, P., Yang, Z., Xu, X. (2023). 3D printing based on meat materials: Challenges and opportunities. *Current Research in Food Science*, 6(12), Article 100423. https://doi.org/10.1016/j.crfs.2022.100423
45. Alarcon-Rojo, A. D., Janacua, H., Rodriguez, J. C., Paniwnyk, L., Mason, T. J. (2015). Power ultrasound in meat processing. *Meat Science*, 107, 86–93. https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2015.04.015
46. Cai, L., Feng, J., Cao, A., Zhang, Y., Lv, Y., Li, J. (2018). Denaturation kinetics and aggregation mechanism of the sarcoplasmic and myofibril proteins from grass carp during microwave processing. *Food and Bioprocess Technology*, 11(2), 417–426. https://doi.org/10.1007/s11947-017-2025-x
47. Wang, Y., Zhou, Y., Wang, X., Li, P., Xu, B., Chen, C. (2020). Water holding capacity of sodium-reduced chicken breast myofibrillar protein gel as affected by combined $CaCl_2$ and high-pressure processing. *International Journal of Food Science and Technology*, 55(2), 601–609. https://doi.org/10.1111/ijfs.14313
48. Yang, H.-J,, Han, M.-Y., Wang, H.-f., Cao, G.-t., Tao, F., Xu, X.-L. et al. (2021). HPP improves the emulsion properties of reduced fat and salt meat batters by promoting the adsorption of proteins at fat droplets/water interface. *LWT*, 137(17), Article 110394. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110394
49. Dick, A., Bhandari, B., Prakash, S. (2019). Post-processing feasibility of composite-layer 3D printed beef. *Meat Science*, 153, 9–18. https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2019.02.024
50. Dick, A., Bhandari, B., Prakash, S. (2019). 3D printing of meat. *Meat Science*, 153, 35–44. https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2019.03.005
51. Zhao, Z., Wang, Q., Yan, B., Gao, W., Jiao, X., Huang, J. et al. (2021). Synergistic effect of microwave 3D print and transglutaminase on the self-gelation of surimi during printing. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 67, Article 102546. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2020.102546
52. Chen, Y., Zhang, M., Bhandari, B. (2021). 3D printing of steak-like foods based on textured soybean protein. *Foods*, 10(9), Article 2011. https://doi.org/10.3390/foods10092011
53. Xia, S., Shen, S., Song, J., Li, K., Qin, X., Jiang, X. et al. 2023). Physicochemical and structural properties of meat analogues from yeast and soy protein prepared via high-moisture extrusion. *Food Chemistry*, 402, Article 134265. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.134265
54. Bhuiyan, Md. H. R., Yeasmen, N., Ngadi, M. (2025). Effect of food hydrocolloids on 3D meat-analog printing and deep-fat-frying. *Food Hydrocolloids*, 159, Article 110716. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2024.110716
55. Su, W., Woo, H., Hyeock, M., Jin, H. (2023). Improved printability of pea protein hydrolysates for protein-enriched 3D printed foods. *Journal of Food Engineering*, 350, Article 111502. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2023.111502
56. Koranne, V., Jonas, O. L. C., Mitra, H., Bapat, S., Ardekani, A. M., Sealy, M. P. et al. (2022). Exploring properties of edible hydrolyzed collagen for 3D food printing of scaffold for biomanufacturing cultivated meat. *Procedia CIRP*, 110, 186–191. https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.06.034
57. Bhuiyan, M. H. R., Ngadi, M. (2024). Thermomechanical transitions of meat-analog based fried foods batter coating. *Food Chemistry*, 447, Article 138953. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.138953
58. Bhuiyan, H. R., Yeasmen, N., Ngadi, M. (2024). Restructuring plant-derived composites towards the production of meat-analog based coated fried food. *Food Chemistry*, 443. Article 138482. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.138482
59. Mittal, S., Bhuiyan, M. H. R., Ngadi, M. (2023). Challenges and prospects of plant-protein-based 3D printing. *Foods*, 12(24), Article 4490. https://doi.org/10.3390/foods12244490
60. Liberty, J. T., Dehghannya, J., Ngadi, M. O. (2019). Effective strategies for reduction of oil content in deep-fat fried foods: A review. *Trends in Food Science and Technology*, 92, 172–183. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.07.050
61. Zhang, X., Zhang, M., Adhikari, B. (2020). Recent developments in frying technologies applied to fresh foods. *Trends in Food Science and Technology*, 98, 68–81. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.02.007
62. Kang, D.-H., Louis, F., Liu, H., Shimoda, H., Nishiyama, Y., Nozawa, H. et al. (2021). Engineered whole cut meat-like tissue by the assembly of cell fibers using tendon-gel integrated bioprinting. *Nature Communications*, 12. Article 5059. https://doi.org/10.1038/s41467-021-25236-9
63. Аймалетдинов, А. М., Маланьева, А. Г., Тамбовский, М. А., Закирова, Е. Ю. (2024). 3D-биопечать, как метод тканевой инженерии: применение и перспективы. *Биотехнология*, 40(2), 3–22. [Aimaletdinov, A. M., Malanieva, A. G., Tambovsky, M. A., Zakirova E. Yu. (2024). 3D bioprinting as a method of tissue engineering: Applications and prospects. *Biotekhnologiya*, 40(2), 3–22. (In Russian)] https://doi.org/10.56304/S0234275824020029

64. Golovin, S. N., Kirichenko, E. Yu., Khanukaev, M. M., Logvinov, A. K. (2026). 3D bioprinting of hybrid cultured meat from rabbit cells and sunflower protein. *Foods and Raw Materials*, 14(1), 52–60. https://doi.org/10.21603/2308-4057-2026-1-659
65. Belova, K., Dushina, E., Popov, S., Zlobin, A., Martinson, E., Vityazev, F. et al. (2023). Enrichment of 3D-Printed k-Carrageenan food gel with callus tissue of narrow-leaved lupin *Lupinus angustifolius*. *Gels*, 9(1), Article 45. https://doi.org/10.3390/gels9010045
66. Zhu, Y., Chen, L., Zhang, X., Meng, T., Liu, Z., Chitrakar, B. et al. (2024). 3D-printed pea protein — based dysphagia diet affected by different hydrocolloids. *Food and Bioprocess Technology*, 17, 1492–1506. https://doi.org/10.1007/s11947-023-03210-1
67. Ульрих, Е. В., Верхотуров, В. В. (2022). Особенности фуд-дизайна на 3D-принтере. Обзор. *Пищевые системы*, 5(2), 100–106. [Ulrikh, E. V., Verkhoturov, V. V. (2022). Features of food design on a 3D printer. A review. *Food Systems*, 5(2), 100–106. (In Russian)]. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2022-5-2-100-106
68. Hemsley, B., Palmer, S., Kouzani, A., Adams, S., Balandin, S. (January 8–11, 2019). *Review informing the design of 3d food printing for people with swallowing disorders: Constructive, conceptual, and empirical problems*. Proceedings of the 52nd Hawaii International Conference on System Sciences, University of Hawai'i at Mānoa, Honolulu, 2019. https://doi.org/10.24251/hicss.2019.692
69. Zhu, W., Iskandar, M. M., Baeghbali, V., Kubow, S. (2023). Three-dimensional printing of foods: A critical review of the present state in healthcare applications, and potential risks and benefits. *Foods*, 12(17), Article 3287. https://doi.org/10.3390/foods12173287
70. Costa, A., Carrion, S., Puig-Pey, M., Juarez, F., Clave, P. (2019). Triple adaptation of the mediterranean diet: Design of a meal plan for older people with oropharyngeal dysphagia based on home cooking. *Nutrient*, 11(2), Article 425. https://doi.org/10.3390/nu11020425
71. Корниенко, В. Ю., Минаев, М. Ю. (2022). Тенденции в развитии трехмерной печати продуктов питания. *Пищевые системы*, 5(1), 23–29. [Kornienko, V. Yu., Minaev, M. Yu. (2022). Trends in the development of 3d food printing. *Food Systems*, 5(1), 23–29. (In Russian)]. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2022-5-1-23-29
72. Derossi, A., Caporizzi, R., Azzollini, D., Severini, C. (2018). Application of 3D printing for customized food. A case on the development of a fruit-based snack for children. *Journal of Food Engineering*, 220, 65–75. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.05.015
73. Vieira, M. V., Oliveira, S. M., Amado, I. R., Fasolin, L. H., Vicente, A. A., Pastrana, L. M. et al. (2020). 3D printed functional cookies fortified with *Arthrospira platensis*: Evaluation of its antioxidant potential and physical-chemical characterization. *Food Hydrocolloids*, 107, Article 105893. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.105893
74. Pant, A., Lee, A. Y., Karyappa, R., Lee, C. P., An, J., Hashimoto, M. et al. (2021). 3D food printing of fresh vegetables using food hydrocolloids for dysphagic patients. *Food Hydrocolloids*, 114, Article 106546. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106546
75. Qiu, L., Zhang, M., Adhikari, B., Lin, J., Luo, Z. (2024). Preparation and characterization of 3D printed texture-modified food for the elderly using mung bean protein, rose powder, and flaxseed gum. *Journal of Food Engineering*, 361(6), Article 111750. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2023.111750
76. Yun, H. J., Jung, W.-K., Kim, H. W., Lee, S. (2023). Embedded 3D printing of abalone protein scaffolds as texture-designed food production for the elderly. *Journal of Food Engineering*, 342, Article 111361. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2022.111361
77. Dick, A., Bhandari, B., Dong, X., Prakash, S. (2020). Feasibility study of hydrocolloid incorporated 3D printed pork as dysphagia food. *Food Hydrocolloids*, 107, Article 105940. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.105940
78. Lille, M., Kortekangas, A., Heinio, R.-L., Sozer, N. (2020). Structural and textural characteristics of 3d-printed protein- and dietary fibre-rich snacks made of milk powder and wholegrain rye flour. *Foods*, 9(11), Article 1527. https://doi.org/10.3390/foods9111527
79. Mirazimi, F., Saldo, J., Sepulcre, F, Gràcia, A., Pujola, M. (2022). Enriched puree potato with soy protein for dysphagia patients by using 3D printing. *Food Frontiers*. 3(4), 706–715. https://doi.org/10.1002/fft2.149
80. Гусаков, Г., Калтович, И. (2024). 3D-печать в индустрии питания. *Наука и инновации*, 10(259), 37–42. [Gusakov, G., Kaltovich, I. (2024). 3D printing in the food industry. *Science and Innovation*, 10(259), 37–42. (In Russian)]
81. Мелещеня, А. В., Гордынец, С. А., Калтович, И. В., Шакель, Т. П., Кимошевская, О. И., Пинчук, Г. П. (2021). Теоретические и практические аспекты использования аддитивных технологий при производстве пищевых продуктов. Минск: Институт мясо-молочной промышленности, 2021. [Meleschenya, A. V., Gordynets, S. A., Kaltovich, I. V., Shakel, T. P., Kimoschevskaya, O. I., Pinchuk, G. P. (2021). Theoretical and practical aspects of using additive technologies in food production. Minsk: Institute of Meat and Dairy Industry, 2021. (In Russian)]
82. Wang, C., Wang, X., Liu, C., Liu, C. (2021). Application of LF-NMR to the characterization of camellia oil-loaded pickering emulsion fabricated by soy protein isolate. *Food Hydrocolloids,* 112, Article 106329. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106329
83. Yang, D., Wu, G., Li, P., Qi, X., Zhang, H., Wang, X. et al. (2020). The effect of fatty acid composition on the oil absorption behavior and surface morphology of fried potato sticks via LF-NMR, MRI, and SEM. *Food Chemistry: X*, 7, Article 100095. https://doi.org/10.1016/j.fochx.2020.100095
84. Shao, J.-H., Deng, Y.-M., Song, L, Batur, A., Jia, N., Liu, D.-Y. (2016). Investigation the effects of protein hydration states on the mobility water and fat in meat batters by LF-NMR technique, *LWT-Food Science and Technology*, 66, 1–6. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.10.008
85. Liu, Z., Zhang, M., Ye, Y. (2020). Indirect prediction of 3D printability of mashed potatoes based on LF-NMR measurements. *Journal of Food Engineering*, 287, Article 110137. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.110137
86. Phuhongsung, P., Zhang, M., Devahastin, S. (2020). Investigation on 3D printing ability of soybean protein isolate gels and correlations with their rheological and textural properties via LF-NMR spectroscopic characteristics. *LWT*, 122, Article 109019. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109019
87. Chen, H.-Z., Zhang, M., Yang, C.-H. (2021). Comparative analysis of 3D printability and rheological properties of surimi gels via LF-NMR and dielectric characteristics. *Journal of Food Engineering*, 292, Article 110278. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.110278
88. Guo, C.-H., Zhang, M., Bhandari, B. (2019). A comparative study between syringe-based and screw-based 3D food printers by computational simulation. *Computers and Electronics in Agriculture*, 162, 397–404. https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.04.032
89. Guo, C., Zhang, M., Devahastin, S. (2020). 3D extrusion-based printability evaluation of selected cereal grains by computational fluid dynamic simulation. *Journal of Food Engineering*, 286, Article 110113. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.110113
90. Yang, F., Guo, C., Zhang, M., Bhandari, B., Liu, Y. (2019). Improving 3D printing process of lemon juice gel based on fluid flow numerical simulation. *LWT*, 102, 89–99. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.12.031
91. Jonkers, N., van Dommelen, J. A. W., Geers, M. G. D. (2020). Experimental characterization and modeling of the mechanical behavior of brittle 3D printed food. *Journal of Food Engineering*, 278, Article 109941. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.109941
92. Nijdam, J. J., LeCorre-Bordes, D., Delvart, A., Schon, B. S. (2021). A rheological test to assess the ability of food inks to form dimensionally stable 3D food structures. *Journal of Food Engineering*, 291, Article 110235. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.110235
93. Kim, H. W., Bae, H, Park, H. J. (2018). Reprint of: Classification of the printability of selected food for 3D printing: Development of an assessment method using hydrocolloids as reference material. *Journal of Food Engineering*, 220, 28–37. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.10.023
94. Xu, P., Li, J., Meda, A., Osei-Yeboah, F., Peterson, M. L., Repka, M. et al. (2020). Development of a quantitative method to evaluate the printability of filaments for fused deposition modeling 3D printing. *International Journal of Pharmaceutics*, 588, Article 119760. https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2020.119760
95. Шибанов, Э. Д., Рылов, С. А., Благовещенский, И. Г. (2023). Алгоритм автоматизированного контроля и управления процессом 3D-печати шоколадной массой. *Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ»*, 16(8), 57–63. [Shibanov, E. D., Rylov, S. A., Blagoveshchensky, I. G. (2023). Algorithm for automated control of the process of 3D printing with chocolate mass. *LETI Transactions on Electrical Engineering and Computer Science,* 16(8), 57–63. (In Russian)] https://doi.org/10.32603/2071-8985-2023-16-8-57-63
96. Pulatsu, E., Su, J.-W., Kenderes, S. M., Lin, J., Vardhanabhuti, B., Lin, M. (2022). Restructuring cookie dough with 3D printing: Relationships between the mechanical properties, baking conditions, and structural changes. *Journal of Food Engineering*, 319, Article 110911. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2021.110911
97. Sun, J., Peng, Z., Zhou, W., Fuh, J. Y. H., Hong, G. S., Chiu, A. (2015). A review on 3D printing for customized food fabrication. *Procedia Manufacturing*, 1, 308–319. https://doi.org/10.1016/j.promfg.2015.09.057
98. Rinshana, P. F., Murugesan, B., Kim, Y. H., Alaguthevar, R., Rhim, J.-W. (2025) Advances in 3D food printing technology: Innovation and applications in the food industry. *Food Science and Biotechnology*, 34, 403–421. https://doi.org/10.1007/s10068-024-01779-7
99. Zhang, J. Y., Pandya, J. K., McClements, D. J., Lu, J., Kinchla, A. J. (2022). Advancements in 3D food printing: A comprehensive overview of properties and opportunities. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 62(17), 4752–4768. https://doi.org/10.1080/10408398.2021.1878103
100. Piyush, C., Kumar, R., Kumar, R. (2020). 3D printing of food materials: A state of art review and future applications. *Materials Today Proceedings*, 33(30), 1463–1467. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.005
101. Baiano, A. (2020). 3D-printed foods: A comprehensive review on technologies, nutritional value, safety, consumer attitude, regulatory framework, and economic and sustainability issues. *Food Reviews International*, 38, 986–1016. https://doi.org/10.1080/87559129.2020.1762091
102. Burke-Shyne, S., Gallegos, D., Williams, T. (2020). 3D food printing: Nutrition opportunities and challenges. *British Food Journal*, 123(2), 649–663. https://doi.org/10.1108/BFJ-05-2020-0441
103. Severini, C., Derossi, A., Ricci, I., Caporizzi, R., Fiore, A. (2018). Printing a blend of fruit and vegetables. New advances on critical variables and shelf life of 3D edible objects. *Journal of Food Engineering*, 220, 89–100. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.08.025
104. Lupton, D., Turner, B. (2018). "Both fascinating and disturbing": Consumer responses to 3D food printing and implications for food activism. Chapter in a book: Digital Food Activism. Routledge, 2018.
105. Ross, M. M., Collins, A. M., McCarthy, M. B., Kelly, A. L. (2022). Overcoming barriers to consumer acceptance of 3D-printed foods in the food service sector. *Food Quality and Preference*, 100, Article 104615. https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2022.104615
106. Lupton, D., Turner, B. (2018). Food of the future? Consumer responses to the idea of 3D-printed meat and insect-based foods. *Food and Foodways*, 26(4), 269–289. https://doi.org/10.1080/07409710.2018.1531213
107. Manstan, T., McSweeney, M. B. (2020). Consumers' attitudes towards and acceptance of 3D printed foods in comparison with conventional food products. *International Journal of Food Science and Technology*, 55(1), 323–331. https://doi.org/10.1111/ijfs.14292
108. Scerra, M., Barrett, A., Eswaranandam, S., Okamoto, M. (2018). Effects of 3D printing and thermal post processing on the stability of vitamin E acetate. *Journal of the Academy of Nutrition and Dietetics*, 118(10), Article A148. https://doi.org/10.1016/j.jand.2018.08.101
109. Martínez-Monzó, J., Cárdenas, J., García-Segovia, P. (2019). Effect of temperature on 3D printing of commercial potato puree. *Food Biophysics*, 14, 225–234. https://doi.org/10.1007/s11483-019-09576-0

110. He, C., Zhang, M., Fang, Z. (2020). 3D printing of food: Pretreatment and post-treatment of materials. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 60(14), 2379–2392. https://doi.org/10.1080/10408398.2019.1641065
111. Parada, J., Aguilera, J. M. (2007). Food microstructure affects the bioavailability of several nutrients. *Journal of Food Science*, 72(2), R21–R32. https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2007.00274.x
112. Smykov, I. T. (2022). Neophobia: Socio-ethical problems of innovative technologies of the food industry. *Food Systems*, 5(4), 308–318. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2022-5-4-308-318
113. Yoha, K. S., Moses, J. A. (2023). 3D printing approach to valorization of agri-food processing waste streams. *Foods*, 12(1), Article 212. https://doi.org/10.3390/foods12010212
114. Jagadiswaran, B., Alagarasan, V., Palanivelu, P., Theagarajan, R., Moses, J. A., Anandharamakrishnan, C. (2021). Valorization of food industry waste and by-products using 3D printing: A study on the development of value-added functional cookies. *Future Foods*, 4(10), Article 100036. https://doi.org/10.1016/j.fufo.2021.100036

| AUTHOR INFORMATION | СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ |
|---|---|
| **Affiliation** | **Принадлежность к организации** |
| **Никитина Марина Александровна** — доктор технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, руководитель направления Информационные технологии Центра «Экономико-аналитических исследований и информационных технологий», Федеральный научный центр пищевых систем им. В. М. Горбатова<br>109316, Москва, ул. Талалихина, 26<br>E-mail: m.nikitina@fncps.ru<br>ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8313-4105<br>* автор для контактов | **Marina A. Nikitina**, Doctor of Technical Sciences, Docent, Leading Scientific Worker, Head of the Direction of Information Technologies of the Center of Economic and Analytical Research and Information Technologies, V. M. Gorbatov Federal Research Center for Food Systems<br>26, Talalikhin str., 109316, Moscow, Russia<br>E-mail: m.nikitina@fncps.ru<br>ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8313-4105<br>* corresponding author |
| **Горбунова Наталья Анатольевна** — кандидат технических наук, ученый секретарь, Федеральный научный центр пищевых систем им. В. М. Горбатова<br>109316, Москва, ул. Талалихина, 26<br>E-mail: n.gorbunova@fncps.ru<br>ORCID: http://orcid.org/0000-0003-4249-9316 | **Nataliya A. Gorbunova**, Candidate of Technical Sciences, Scientific Secretary, V. M. Gorbatov Federal Research Center for Food Systems<br>26, Talalikhin str., 109316, Moscow, Russia<br>E-mail: n.gorbunova@fncps.ru<br>ORCID: http://orcid.org/0000-0003-4249-9316 |
| **Contribution** | **Критерии авторства** |
| 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. |
| **Conflict of interest** | **Конфликт интересов** |
| The authors declare no conflict of interest. | Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. |