

Volume 8, Issue 4, 2025

ПИЩЕВЫЕ СИСТЕМЫ
ПИЩЕВЫЕ СИСТЕМЫ

ПИЩЕВЫЕ СИСТЕМЫ
FOOD SYSTEMS

FOOD SYSTEMS
FOOD SYSTEMS
FOOD SYSTEMS
FOOD SYSTEMS
FOOD SYSTEMS
FOOD SYSTEMS
FOOD SYSTEMS
FOOD SYSTEMS
FOOD SYSTEMS

ISSN 2618-9771 (Print)

ISSN 2618-7272 (On line)

<http://www.fsjour.com>

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

Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации

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

ПИЩЕВЫЕ СИСТЕМЫ
www.fsjour.com

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

РЕДАКЦИЯ

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

Журнал зарегистрирован в Роскомнадзоре

Регистрационные данные:

ПИ № ФС77-71610 от 13.11.2017

ЭЛ № ФС 77-72022 от 26.12.2017

Издается с 2018 года.

Материалы публикуются на условиях лицензии CC BY 4.0

Цена свободная.

Периодичность — 4 номера в год.

Подписано в печать 29.12.2025.

Дата выхода в свет 30.12.2025.

Тираж 300 экз. Заказ № 142.

© ФНЦПС, 2025

© Авторы, 2025

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 — Адъюнкт-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 Наталья 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 Abdelmaksoud — Доктор пищевых наук, Адъюнкт-профессор Кафедры 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 биорегулируемого 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

16+

ISSN 2618-9771 (Print)

ISSN 2618-7272 (Online)

DOI-prefix: 10.21323/2618-9771

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

**Minister of Science and Higher Education
of the Russian Federation**

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

FOOD SYSTEMS
www.fsjour.com

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

EDITORIAL OFFICE:

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

The Journal is registered in the Federal Service on Supervision
in the sphere of communication industry, information
technologies and public communications.

The certificate of registration is
PI № FS 77 – 71610 of 13.11.2017
EL № FS 77 – 72022 of 26.12.2017

Founded in 2018.

This work is licensed under a
Creative Commons Attribution 4.0 License
Free price.

Frequency — 4 issues a year.

Signed print 29.12.2025.

Released from press 30.12.2025.

Circulation — 300 copies. Order № 142.



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

© FNCPS, 2025
© Authors, 2025

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, Sagami-hara, 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, Mytishchi, Moscow region, Russia

Alla A. Kochetkova, Doctor of technical sciences, Professor, Head of the «Laboratory of food biotechnologies 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. Miroshnikov, 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

Гаравири М., Дегтярев И. А., Алексаночкин Д. И., Фоменко И. А., Машенцева Н. Г. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФЕРМЕНТАТИВНОГО ГИДРОЛИЗА РАСТИТЕЛЬНЫХ БЕЛКОВ <i>IN SILICO</i> И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ БИОЛОГИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ ОБРАЗУЮЩИХСЯ ПЕПТИДОВ	472
Федулова Л. В., Кибиткина А. А., Василевская Е. Р., Карабанов С. Ю., Утьянов Д. А. МИКРОНУТРИЕНТЫ И БИОАКТИВНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ В НЕЙРОПРОТЕКЦИИ: ПОТЕНЦИАЛ, МЕХАНИЗМЫ, ИСТОЧНИКИ	479
Сорокина Н. П., Смыков И. Т., Кучеренко И. В., Кураева Е. В., Дуганова А. Ю. ВЛИЯНИЕ ЛИОФИЛИЗАЦИИ И КРИОПРОТЕКЦИИ НА ВЫЖИВАЕМОСТЬ КУЛЬТУР <i>LACTIPLANTIBACILLUS PLANTARUM</i>	488
Путилов В. Э., Непомнящий А. П., Причепа А. О., Белова Д. Д., Шарова Н. Ю. АНТИМИКРОБНЫЕ ПЛЕНКИ НА ОСНОВЕ КАРТОФЕЛЬНОГО КРАХМАЛА С ДОБАВЛЕНИЕМ МОЛОЧНОЙ КИСЛОТЫ	498
Мистенева С. Ю. ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ ПЕНООБРАЗНЫХ ЭМУЛЬСИЙ ДЛЯ КЕКСОВ	506
Березина Е. А., Кийски В. Д., Казанкин Н. А., Кригер О. В., Яковченко Н. В. БИОЛОГИЧЕСКИ АКТИВНЫЕ ВЕЩЕСТВА РАСТИТЕЛЬНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ: МЕТОДЫ ВЫДЕЛЕНИЯ И АНАЛИЗА	515
Луткова Н. Ю., Иванова Е. В., Червяк С. Н., Лутков И. П. ВЛИЯНИЕ СПОСОБА ХРАНЕНИЯ ДРОЖЖЕЙ НА КАЧЕСТВО МОЛОДЫХ ИГРИСТЫХ ВИН	524
Раева-Богословская Е. Н., Молканова О. И., Крахмалева И. Л., Кузнецова О. А., Утьянов Д. А., Митрофанова И. В. ХЕНОМЕЛЕС: ПЕРСПЕКТИВНЫЙ ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ПРОДУКТ ДЛЯ ПИЩЕВОЙ И ФАРМАЦЕВТИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ	533
Беленко А. А., Путилов В. Э., Непомнящий А. П., Причепа А. О., Семенова А. А., Ситнов В. Ю., Сорокина Н. П. ОСНОВНЫЕ СТРАТЕГИИ СИНТЕЗА МОЛОЧНОЙ КИСЛОТЫ У КЛЮЧЕВЫХ ВИДОВ <i>LACTOBACILLACEAE</i> : ФИЛОГЕНЕТИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ, МЕТАБОЛИЧЕСКИЕ ПУТИ И ГЕНЕТИЧЕСКАЯ РЕГУЛЯЦИЯ	541
Andi Juliana, Fatma Maruddin, Wahniyathi Hatta PURPLE SWEET POTATO AS A NATURAL STABILIZER IN DAIRY PRODUCTS	555
Дуганова А. Ю., Сорокина Н. П., Мамыкин Д. С., Семенова А. А., Рогов Г. Н., Беленко А. А. ДИФФЕРЕНЦИРОВАННАЯ ОЦЕНКА ФЕРМЕНТАТИВНОЙ АКТИВНОСТИ <i>LACTOCOCCUS</i> ДЛЯ СОЗДАНИЯ ЗАКВАСОК ПРЯМОГО ВНЕСЕНИЯ	566
Ahmed A. Baoumy, Fayrouz A. Abdeldayem, Tasneem T. Abdelfattah, Maria M. Aziz, Rawan R. Hamed, Yasmine H. Yousef, Tarek G. Abdelmaksoud DEVELOPMENT AND EVALUATION OF LOW-CALORIE STRAWBERRY JAM ENRICHED WITH PSYLLIUM HUSK: A FUNCTIONAL INGREDIENT APPROACH	576
Ульрих Е. В., Сухих С. А., Самусев И. Г., Бабич О. О. СКВАЛЕН — ПРИРОДНЫЙ БИОЛОГИЧЕСКИ АКТИВНЫЙ КОМПОНЕНТ ПИТАНИЯ В XXI ВЕКЕ	583
Great I. Edo, Alice N. Mafe, Tayser S. Gaaz, Izuwa Iwanegbe, Agatha N. Jikah, Kugbere Emumejaye, Emad Yousif, Joseph O. Owheru, Ufuoma A. Igbuku, Ephraim E. A. Oghoro, Raghda S. Makia, Arthur E. A. Essaghah, Dina S. Ahmed, Huzaifa Umar FOOD-CONTACT SURFACES COATED WITH ANTIMICROBIAL POLYMERIC MATERIALS	595
Кузлякина Ю. А., Замула В. С., Кузнецова О. А., Ребезов М. Б., Петрунина И. В., Горбунова Н. А. МЯСНАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ РОССИИ В ОБЛАСТИ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ	607
Зинина О. В., Чанов И. М., Ребезов М. Б., Ли Я., Ли Ч., Чжао И. ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ГИДРОЛИЗА КАЗЕИНА	616
Виров А. И., Аксенов А. С., Сорокина Т. Ю. ИЗМЕНЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ЧЕТЫРЕХ ТОКСИЧНЫХ И ДВУХ ЭССЕНЦИАЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ФИЛЕ СЕМГИ ПРИ КУЛИНАРНОЙ ОБРАБОТКЕ РАЗЛИЧНЫМИ СПОСОБАМИ	624

DOI: <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-4-472-478>

Поступила 17.06.2025

Поступила после рецензирования 09.10.2025

Принята в печать 13.10.2025

© Гаравири М., Дегтярев И. А., Алексаночкин Д. И., Фоменко И. А., Машенцева Н. Г., 2025

<https://www.fsjour.com/jour>

Научная статья

Открытый доступ

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФЕРМЕНТАТИВНОГО ГИДРОЛИЗА РАСТИТЕЛЬНЫХ БЕЛКОВ *IN SILICO* И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ БИОЛОГИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ ОБРАЗУЮЩИХСЯ ПЕПТИДОВ

Гаравири М., Дегтярев И. А.*, Алексаночкин Д. И., Фоменко И. А., Машенцева Н. Г.

Российский биотехнологический университет, Москва, Россия

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: АННОТАЦИЯ

пептиды,
гидролизаты,
биологическая
активность,
растительные белки,
нут, рапс, конопля,
in silico

Традиционный подход к получению, идентификации и подтверждению биологической активности пептидов является трудоемким и занимает много времени. Развитие биоинформатики и компьютерного моделирования позволило предварительно проводить теоретическую оценку потенциальной биологической активности пептидов. Целью исследования являлось проведение теоретического ферментативного гидролиза *in silico* белков нута, рапса и конопли, а также прогнозирование профиля потенциальной биологической активности образующихся пептидов с использованием инструментов биоинформатики. В результате поиска исходных аминокислотных последовательностей белков нута, рапса и конопли в БД UniProtKB по ключевым словам «*Cicer arietinum*», «*Brassica napus*», «*Cannabis sativa*», а также происхождению белка — «Storage protein», у белков нута было обнаружено 5 изоформ легумина, 3 изоформы вицилина и 2 изоформы провизицина; рапсовые белки содержали 6 изоформ белка круциферина и 7 изоформ напина; конопляные белки содержали 3 изоформы эдестина-1 и эдестина-2, 2 изоформы эдестина-3 и 1 изоформу альбумина. После гидролиза с использованием инструментов базы данных BIOPEP-UWM было получено 10131 аминокислотная последовательность белков нута, 7206 аминокислотных последовательностей белков рапса и 8479 аминокислотных последовательностей белков конопли. В результате классификации полученных пептидов по предсказанной величине их биологической активности с помощью PeptideRanker, а также после предсказания токсичности, горечи и аллергенности, было выявлено 35 биологически активных пептидов (БАП) из белков нута, 21 — из белков рапса и 22 — из белков конопли. Для белков нута было предсказано 29 потенциальных ингибиторов АПФ, 27 ингибиторов DPP IV, 6 онкостатических, 4 антиоксидантных, 4 противогрибковых пептида и 3 антигипертензивных; для рапса определено 22 потенциальных ингибитора DPP IV и 20 ингибиторов АПФ, 5 противогрибковых пептидов, 3 пептида с потенциальным антиоксидантным эффектом, 3 с антитромботическими свойствами, 2 антигипертензивных пептида, 2 с онкостатическими свойствами и 1 с антибактериальной активностью; для 16 пептидов конопли определена потенциальная АПФ-ингибирующая активность, 15 являются ингибиторами DPP IV, 7 с противогрибковой активностью, 5 с антиоксидантным и онкостатическим эффектом, 4 с антигипертензивными свойствами, 1 с противотуберкулезным эффектом. В перспективе необходимы дальнейшие исследования *in vitro* и *in vivo* для подтверждения биологической активности, т. к. имеется потенциальное расхождение между результатами *in silico* моделирования гидролиза и прогнозирования биологической активности и данными экспериментальных исследований.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 25-16-00178).

Received 17.06.2025

Accepted in revised 09.10.2025

Accepted for publication 13.10.2025

© Gharaviri M., Degtyarev I. A., Aleksanochkin D. I., Fomenko I. A., Mashentseva N. G., 2025

Available online at <https://www.fsjour.com/jour>

Original scientific article

Open access

MODELING OF THE PROCESS OF ENZYMATIC HYDROLYSIS OF PLANT PROTEINS *IN SILICO* AND PREDICTION OF THE BIOLOGICAL ACTIVITY OF THE RESULTING PEPTIDES

Mahmood Gharaviri, Ivan A. Degtyarev,* Denis I. Aleksanochkin, Ivan A. Fomenko, Natalya G. Mashentseva

Russian Biotechnological University, Moscow, Russia

KEYWORDS:

peptides, hydrolysates,
biological activity,
plant proteins,
chickpea, rapeseed,
hemp, *in silico*

ABSTRACT

The traditional approach to obtaining, identifying, and confirming the biological activity of peptides is laborious and time-consuming. The development of bioinformatics and computer modeling made it possible to carry out a preliminary theoretical assessment of the potential biological activity of peptides. The aim of the study was to carry out theoretical enzymatic hydrolysis *in silico* of chickpea, rapeseed and hemp proteins, as well as to predict the profile of potential biological activity of the resulting peptides using bioinformatics tools. As a result of the search for the initial amino acid sequences of chickpea, rapeseed and hemp proteins in the UniProtKB database using the keywords “*Cicer arietinum*”, “*Brassica napus*”, “*Cannabis sativa*”, as well as the origin of the protein — “Storage protein”, 5 isoforms of legumin, 3 isoforms of vicilin and 2 isoforms of provicilin were found in chickpea proteins; rapeseed proteins contained 6 isoforms of cruciferin protein and 7 isoforms of napine; hemp proteins contained 3 isoforms of edestin-1 and edestin-2, 2 isoforms of edestin-3 and 1 isoform of albumin. After hydrolysis using the tools of the BIOPEP-UWM database, 10,131 amino acid sequences of chickpea proteins, 7,206 amino acid sequences of rapeseed proteins and 8,479 amino acid sequences of hemp proteins were obtained. As a result of the classification of the obtained peptides according to the predicted value of their biological activity using PeptideRanker, as well as after predicting toxicity, bitterness and allergenicity, 35 biologically active peptides (BAPS) were identified from chickpea proteins, 21 from rapeseed proteins and 22 from hemp proteins. For chickpea proteins, 29 potential ACE inhibitors, 27 DPP IV inhibitors, 6 oncstatic, 4 antioxidant, 4 antifungal and 3 antihypertensive peptides were predicted. For rapeseed, 22 potential DPP IV

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Гаравири, М., Дегтярев, И. А., Алексаночкин, Д. И., Фоменко, И. А., Машенцева, Н. Г. (2025). Моделирование процесса ферментативного гидролиза растительных белков *in silico* и прогнозирование биологической активности образующихся пептидов. *Пищевые системы*, 8(4), 472–478. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-4-472-478>

FOR CITATION: Gharaviri, M., Degtyarev, I. A., Aleksanochkin, D. I., Fomenko, I. A., Mashentseva, N. G. (2025). Modeling of the process of enzymatic hydrolysis of plant proteins *in silico* and prediction of the biological activity of the resulting peptides. *Food Systems*, 8(4), 472–478. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-4-472-478>

inhibitors and 20 ACE inhibitors, 5 antifungal peptides, 3 peptides with potential antioxidant effect, 3 with antithrombotic properties, 2 antihypertensive peptides, 2 with oncostatic properties and 1 with antibacterial activity were determined. Potential ACE-inhibiting activity was determined for 16 hemp peptides, 15 are DPP IV inhibitors, 7 have antifungal activity, 5 have antioxidant and oncostatic effects, 4 have antihypertensive properties, 1 has antituberculous effect. In the future, further *in vitro* and *in vivo* studies are needed to confirm biological activity, as there is a potential discrepancy between the results of *in silico* modeling of hydrolysis and prediction of biological activity and the data from experimental studies.

FUNDING: This work was performed under the Russian Science Foundation grant No. 25-16-00178.

1. Введение

Биологические активные пептиды (БАП), полученные на основе пищевых белков, все чаще рассматриваются как потенциальные функциональные ингредиенты ввиду их способности участвовать в регуляции физиологических процессов в организме человека, а также благодаря отсутствию побочных эффектов. Растущий интерес к БАП, полученным из пищевых белков, обусловлен высоким спросом на нутрицевтики природного происхождения. Это связано с их разнообразной биологической активностью, подчеркивающей потенциал пептидов в профилактике и лечении хронических заболеваний [1,2].

Также было отмечено, что функциональность и потенциальная биологическая активность определяются длиной пептидов и аминокислотной последовательностью [3]. Следовательно, функциональность пептидов напрямую зависит от фермента и параметров процесса деструкции белков. Благодаря эмпирическим исследованиям было идентифицировано более тысячи БАП, полученных на основе пищевых белков, часть из которых была коммерциализирована [1]. Наиболее распространенные методы получения БАП — ферментативный гидролиз с использованием ферментных препаратов растительного, животного и микробного происхождения, микробная ферментация, а также химический гидролиз и синтез, если известна аминокислотная последовательность [4]. Были описаны *in vitro* биологически активные пептиды, обладающие антиоксидантными [5], противодиабетическими [3], антигипертензивными [6] и другими свойствами.

Современные достижения в области протеомики и пептидомтики приводят к интеграции новых методов исследования — биоинформационных. В этой связи эксперименты *in silico* являются перспективными инструментами для проведения протеолиза и исследования теоретических биологических активностей пептидов. Классический подход к получению БАП является достаточно трудоемким процессом и занимает много времени, существует необходимость в использовании специфического и дорогостоящего оборудования — хроматографов и масс-спектрометров [7]. Перечисленные ограничения можно обойти за счет использования инструментов биоинформатики, что стало стратегическим подходом к поиску уже известных и новых пептидов на основе пищевых белков [8].

Протеомные исследования привели к накоплению обширных массивов данных о белковых структурах. Исследование БАП обычно начинается с получения аминокислотных последовательностей белков, для чего используют следующие базы данных (БД): UniprotKB (<https://www.uniprot.org/>), включающую более 120 млн последовательностей белков, Research Collaboratory for Structural Bioinformatics Protein Data Bank, имеющую 235 458 подтвержденных структур белков и 1068 577, полученных виртуально (RCSB PDB, <https://www.rcsb.org/>), и NCBI (<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/>), включающую данные из аннотированных записей в GenBank, RefSeq и TrEMBL, а также записи из БД SwissProt, PIR, PRF и PDB [7]. После получения белков с известными аминокислотными последовательностями проводят процесс ферментативной деструкции *in silico* — компьютерного моделирования с использованием БД BIOPEP-UWM-Enzymes Action и PeptideCutter-ExPASy (https://web.expasy.org/peptide_cutter/) [2,9]. В данных БД исследователь может выбрать отдельные протеазы из представленного перечня или их комбинацию: в последнем случае будет учтена специфика расщепления пептидных связей используемых ферментов при симуляции высвобождения пептидов из выбранного белка.

После получения профиля пептидов в результате ферментативного гидролиза *in silico* проводят оценку потенциальной биологической активности. Для оценки общей потенциальной биологической активности используют инструмент PeptideRanker, который изучает представленную аминокислотную последовательность на предмет вероятности быть биологически активной на основе нейронной сети N-to-1 [10]. Далее пептиды оценивают на предмет потенциальной токсичности в БД ToxinPred 3.0 [11] и горечи в БД BitterDB [12]. БД BIOPEP-UWM также позволяет предсказывать потенциальные био-

логические активности исследуемых пептидов [13]. Также возможно предсказать пептиды, являющиеся потенциальными аллергенами, с использованием БД AlgPred 2.0 [14]. Кроме того, их биологическую активность можно оценить с помощью специализированных ресурсов: антибактериальную — AntiBP2 [15], антигипертензивную — ANTPin [16], противотуберкулезную — AntiTbPred [17], противоопухолевую — AntiCP 2.0 [18] и противогрибковую — AntiFp [19].

Нут, рапс и конопля представляют собой ценные источники растительного белка, способные внести значительный вклад в решение проблемы обеспечения населения полноценным питанием. Нут характеризуется высоким содержанием белка, богатого лизином — незаменимой аминокислотой, являющейся лимитирующей. Рапс также содержит значительное количество белка, который может быть использован в пищевой промышленности после соответствующей обработки и выделения. Конопля, благодаря высокому содержанию белка в семенах, открывает новые возможности для производства белковых ингредиентов, адаптированных к различным отраслям пищевой индустрии. Развитие технологий переработки этих культур и интеграция растительных белков в состав пищевых продуктов, а также получение биологически активных пептидов на их основе способствует обеспечению населения полноценным и разнообразным питанием, снижению зависимости от источников животного белка и устойчивому развитию сельского хозяйства [20,21].

Целью настоящего исследования являлось проведение теоретического ферментативного гидролиза *in silico* белков нута, рапса и конопли, а также прогнозирование профиля потенциальной биологической активности образующихся пептидов с использованием инструментов биоинформатики.

2. Объекты и методы

Аминокислотные последовательности белков нута, рапса и конопли были получены в формате FASTA в БД UniProtKB. Поиск в данной БД был осуществлен на основе латинских наименований источников белков: «*Cicer arietinum*», «*Brassica napus*», «*Cannabis sativa*», а также с учетом типа белка — «Storage protein».

In silico протеолиз белков нута, рапса и конопли был проведен с помощью инструмента Enzymes Action в БД BIOPEP-UWM (<https://biochemia.uwm.edu.pl/biopep-uwm/>) с использованием ферментов пепсина, pH > 2,0 (EC3.4.23.1), трипсина (EC3.4.21.4), протеиназы К (EC3.4.21.67), папаина (EC3.4.22.2) и бромелаина (EC3.4.22.32). Для моделирования желудочно-кишечного пищеварения использовали комбинацию ферментов пепсин + трипсин.

Для дальнейших исследований были отобраны пептиды, обладающие потенциальной биологической активностью. PeptideRanker (<http://distilldeep.ucd.ie/PeptideRanker/>) присваивает баллы исследуемым аминокислотным последовательностям от 0 до 1,0. При значении ≥ 0,8 считается, что пептид прогнозируется как биологически активный, при этом исключаются ложноположительные результаты [10].

Из полученного перечня пептидов были исключены те аминокислотные последовательности, для которых предсказана потенциальная токсичность и аллергенность в БД ToxinPred 3.0 (<https://webs.iitd.edu.in/raghava/toxinpred/design.php>) и AlgPred 2.0 (<https://webs.iitd.edu.in/raghava/algpred2/>), а также горькие пептиды, поиск которых был проведен на основе БД горьких пептидов BitterDB. Для оценки потенциальной горечи исследуемых пептидов была применена модель с установленным интерпретатором Python (версия 3.13) с использованием библиотеки Biopython для обработки FASTA-файлов, Pandas для обработки табличных данных и Scikit-learn для построения модели машинного обучения. Для предсказания горечи использовали данные БД BitterDB (https://bitterdb.agri.huji.ac.il/downloads/2024/?file=BitterCompoundsPropA_2024.csv). Из БД последовательностей горьких пептидов были извлечены признаки, характеризующие горечь, и на их основе был обучен классификатор горечи с помощью алгоритма Random Forest в Python. Для определения горьких пептидов был установлен порог Threshold ≥ 0,7, исследуемые

пептиды были определены как горькие или негорькие на основе полученного прогноза.

После классификации пептидов на основе предсказанного уровня их биологической активности, токсичности, аллергенности и горечи проводили оценку потенциального профиля биологической активности в БД BIOPEP-UWM с использованием инструмента Profiles of potential biological activity. Выполняли поиск пептидов с потенциальными АПФ-ингибирующей, DPP-IV-ингибирующей и антиопухолевыми эффектами — в БД AntiTbPred (<https://webs.iiitd.edu.in/raghava/antitbpred/>) и AntiCP 2.0 (<https://webs.iiitd.edu.in/raghava/anticp2/>), противогрибковые пептиды — в БД Antifp (<https://webs.iiitd.edu.in/raghava/antifp/>).

3. Результаты и обсуждение

В белках нута 8–14% от общего содержания белков относятся к альбуминам. На глобулины приходится 55–60% общей белковой фракции. Основными белками нута являются 11S легумин, 7S вицилин и провизилин [22,23]. Рапсовые белки представлены преимущественно кротеином и напином [24]. Наиболее распространенными белками семян конопли являются эдестин (11S глобулин) и 2S альбумин [25].

В БД UniProtKB был проведен поиск белков нута, рапса и конопли. В Таблице 1 представлены Uniprot ID, наименование белков и количество аминокислотных остатков.

К основным запасным белкам нута, найденным в БД UniProtKB, были отнесены легумин, вицилин и провизилин. Суммарно для легумина было определено 5 изоформ, 3 изоформы — для вицилина и 2 изоформы — для провизилина. Рапсовые белки содержали 6 изоформ белка кротеина и 7 изоформ белка напина. Конопляные белки содержали 3 изоформы эдестина-1 и эдестина-2, 2 изоформы эдестина-3 и 1 альбумина.

Далее проводили моделирование расщепления пептидных связей в аминокислотных последовательностях белков нута, рапса и конопли в БД BIOPEP-UWM с использованием ферментов трипсина + пепсина, протеиназы К, папаина и бромелаина. Всего для белков нута было получено 10131 аминокислотная последовательность, из них пептидов, в которых присутствует три и более аминокислотных остатка — 2098. С белками рапса в результате протеолиза было получено 7206 аминокислотных последовательностей, полипептидов с тремя и более аминокислотных остатка — 1576. Общее количество аминокислотных последовательностей для белков конопли составило 8 479, из них пептидов с тремя и более аминокислотных остатка — 1837.

Для дальнейших исследований были отобраны пептиды, которые содержали 3 и более аминокислотных остатка, что обусловлено более высокой структурной стабильностью и специфичностью взаимодействия с биологическими молекулами длинных пептидов, которые формируют устойчивые вторичные структуры [26]. Также короткие пептиды быстрее подвергаются ферментативной деструкции в биологических системах, что снижает их функциональную значимость [27]. Выбранный подход соответствует установленной практике в пептидомике и биоинформатике.

Далее с использованием инструментов БД PeptideRanker были отобраны пептиды, для которых вероятность проявлять биологическую активность составляла $\geq 0,8$:

- 50 пептидов нута;
- 38 пептидов рапса;
- 36 пептидов конопли.

При этом были исключены токсичные и горькие пептиды. Для определения токсичных пептидов воспользовались функцией Motif Scan Module в БД ToxinPred 3.0 на основе модели MERCI. Анализ аллергенности был проведен в БД AllgPred 2.0 в разделе Prediction of Allergens при стандартном значении порога Threshold $\geq 0,3$.

С учетом того, что некоторые аминокислотные последовательности пептидов встречались несколько раз при действии на изоформы белков нута, рапса и конопли различных ферментов, для нута было получено суммарно 50 БАП, при этом токсичных и аллергенных пептидов не обнаружено, а количество БАП, которые не были определены как горькие, составило 35. Для белков рапса было отобрано 38 пептидов со значением PeptideRanker Score $\geq 0,8$. Среди них 38 пептидов не являлись аллергенными и был обнаружен один токсичный пептид — PPPPQQCCNEL, полученный при действии фер-

Таблица 1. Аминокислотные последовательности запасных белков нута, рапса и конопли, полученные в БД UniProtKB, наименование белков и количество аминокислотных остатков
Table 1. Amino acid sequences of storage proteins of chickpea, rapeseed and hemp obtained in the UniProtKB database, name of proteins and the number of amino acid residues

№	Uniprot ID	Наименование белка	Количество аминокислотных остатков	Молекулярная масса, кДа
Нут				
1	Q9SMJ4	Legumin	496	56,25
2	A0A1S3E1N3	Legumin J	551	62,71
3	A0A3Q7XNW1	Legumin-like	500	56,27
4	A0A1S2XSB9	Legumin A-like	518	59,34
5	A0A1S2XVG1	Legumin J-like	532	60,37
6	A0A1S2XQR4	Vicilin-like	455	51,83
7	A0A1S2XQ88	Vicilin-like	446	51,08
8	A0A1S2Y087	Vicilin-like	593	69,39
9	Q304D4	Provicilin	453	51,42
10	A0A1S2XYZ0	Provicilin-like	558	64,65
Рапс				
1	P11090	Cruciferin	488	53,75
2	P33522	Cruciferin CRU4	465	51,37
3	P33523	Cruciferin BnC1	490	53,82
4	P33524	Cruciferin BnC2	496	54,29
5	P33525	Cruciferin CRU1	509	56,50
6	P17333	Napin	180	20,31
7	P01090	Napin-2	178	20,10
8	P24565	Napin-1A	110	12,69
9	P27740	Napin-B	178	20,11
10	P09893	Napin embryo-specific	186	21,01
11	P80208	Napin-3	125	14,03
12	P01091	Napin-1	133	15,29
Конопля				
1	A0A090CXP5	Edestin 1	511	58,43
2	A0A090CXP7	Edestin 1	511	58,52
3	A0A090DLH8	Edestin 1	511	58,50
4	A0A090CXP9	Edestin 2	491	55,97
5	A0A090DLI7	Edestin 2	491	55,97
6	A0A090CXP8	Edestin 2	491	55,98
7	A0A219D3H6	Edestin 3	491	55,93
8	A0A219D2X4	Edestin 3	493	56,08
9	A0A219D1L6	Albumin	142	16,74

мента бромелаина на белок P09893 (напин эмбриоспецифичный). Количество не горьких пептидов составило 21. Количество БАП для белков конопли составило 36, при этом не обнаружено потенциальных токсичных и аллергенных пептидов, а количество не горьких пептидов составило 22.

Результаты протеолиза белков *in silico* и распределения пептидов по группам представлены на Рисунке 1.

Далее проводили оценку потенциальной биологической активности отобранных пептидов в БД BIOPEP-UWM. Для всех исследуемых пептидов был проведен поиск совпадений с известными биологически активными последовательностями. Также провели предсказание потенциальных антибактериальных пептидов (БД AntiB3.0), противогрибковых пептидов (БД Antifp), антигипертензивных пептидов (БД АНТpin) и пептидов с потенциальными противотуберкулезными и противоопухолевыми эффектами (AntiTbPred и AntiCP 2.0). Результаты предсказанных биологических активностей пептидов нута представлены на Рисунке 2.

Анализ потенциальной биологической активности пептидов показал, что БАП, полученные из белков нута, рапса и конопли, обладают большим потенциалом для применения в составе пищевых продуктов, в медицинских и фармацевтических исследованиях. Для нута количество пептидов, обладающих потенциальной

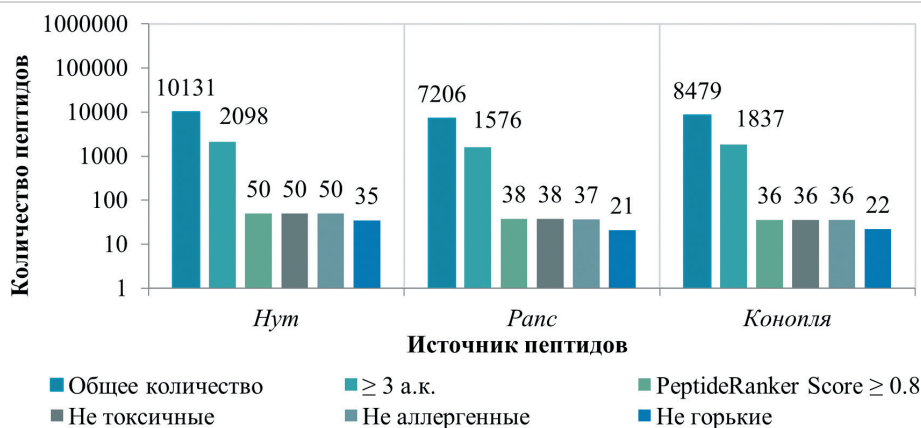


Рисунок 1. Результаты протеолиза белков нута, рапса и конопли, а также распределение пептидов по группам с использованием инструментов БД PeptideRanker, ToxinPred 3.0, AlgPred 2.0 и BitterDB
Figure 1. Results of proteolysis of chickpea, rapeseed and hemp proteins, and the distribution of peptides by groups using tools of the databases PeptideRanker, ToxinPred 3.0, AlgPred 2.0 and BitterDB

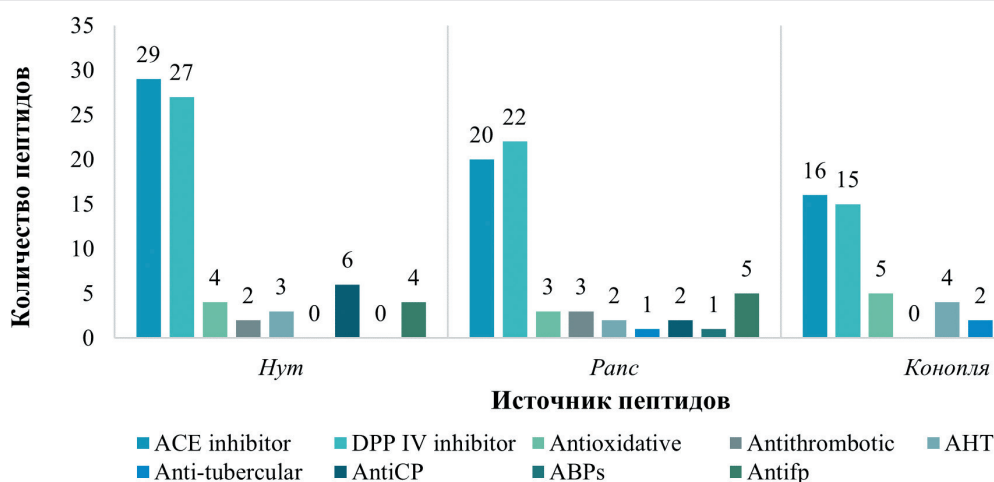


Рисунок 2. Результаты прогнозирования теоретической биологической активности пептидов нута, рапса и конопли с использованием инструментов БД BIOPEP-UWM, AntiBP 3.0, AHTpin, AntiTbPred и AntiCP 2.0, Antifp
Figure 2. Results of prediction of theoretical biological activity of chickpea, rapeseed and hemp peptides using the tools of the databases BIOPEP-UWM, AntiBP 3.0, AHTpin, AntiTbPred and AntiCP 2.0, Antifp

АПФ-ингибирующей (ACE inhibitors) активностью, составило 29, для рапса — 20, для конопли — 16. Количество ингибиторов DPP IV (гипогликемический эффект) составило 27 для нута, 22 и 15 — для рапса и конопли соответственно. Наибольшее количество антиоксидантных пептидов было предсказано для пептидов конопли — WSY, SWN, GCP, MYMR и MYG.

В Таблице 2 представлены пептиды, полученные в ходе *in silico* протеолиза белков нута, рапса и конопли, обладающие наиболее широким профилем потенциальной биологической активности.

В ходе гидролиза легумина J-подобного белка (A0A1S2XVG1) протеиназой K получены пептиды с потенциальной антитромботической активностью — DRF и QDEEDEDEDEQEQGHSSQREEEDDDEDESHSHESRQKW. На основе белков рапса круциферина (P11090), круциферина BnC1 (P33523) и круциферина BnC2 (P33524) получен пептид WIEF под действием папаина или бромелаина, обладающий потенциальным антибактериальным эффектом. Для белка конопли альбумина (A0A219D1L6) с использованием папаина или бромелаина получен пептид MYMR с потенциальным антибактериальным эффектом. Среди исследуемых пептидов был обнаружен фрагмент QWR, полученный в ходе протеолиза белка круциферина CRU1 (Uniprot ID P33525) папаином, который обладает потенциальной антибактериальной активностью. В общем количестве для белков нута было получено 29 потенциальных ингибиторов АПФ, 27 ингибиторов DPP IV, 6 онкостатических, 4 антиоксидантных, 4 противогрибковых и 3 антигипертензивных пептида. Среди полученных пептидов рапса определено 22 потенциальных ингибитора DPP IV и 20 ингибиторов АПФ, 5 пептидов с антигипертензивным эффектом, 3 пептида с потенциальным антиоксидантным эффектом, 3 с антитромботическими свойствами, 2 антигипертензивных пептида, 2 с онкостатическими свойствами и 1 с антибактериальной активностью. Для 16 пепти-

дов конопли определена потенциальная АПФ-ингибирующая активность, 15 являются ингибиторами DPP IV, 7 с противогрибковой активностью, 5 с антиоксидантным и онкостатическим эффектами, 4 с антигипертензивными свойствами, 1 с противотуберкулезным эффектом.

В научной литературе описано применение ферментов, аналогичных тем, которые использовались в данном *in silico* исследовании. Была изучена способность пепсина высвобождать АПФ-ингибирующие пептиды из белков нута, фасоли, чечевицы, люпина и гороха [28]. Под действием фермента пепсин на белки подсолнечника, рапса и сои были получены пептиды с антиоксидантным эффектом, а при действии папаина на белки семян конопли высвобождались пептиды с онкостатическими свойствами [29]. Сообщалось об онкостатических, антимикробных и противовоспалительных эффектах пептидов нута, полученных при действии на белки ферментов пепсина, трипсина, химотрипсина, алкалазы, флаворизма и папаина [30].

Прогнозирование биологической активности пептидов с использованием методов биоинформатики может не всегда соответствовать экспериментальными данными *in vivo* [31], поскольку предсказанная биологическая активность зачастую не находит подтверждения в реальных исследованиях. По этой причине биоинформационный анализ следует рассматривать как эффективный инструмент предварительного скрининга или дополнительное средство исследования биологически активных пептидов. Точность биоинформационного прогнозирования напрямую зависит от качества и полноты данных в используемых базах. Включение экспериментально подтвержденных данных, в том числе посредством кластеризации, позволит существенно повысить надежность моделей предсказания биологической активности.

Таблица 2. Пептиды нута, рапса и конопли, обладающие широким профилем биологической активности

Table 2. Chickpea, rapeseed and hemp peptides with the broad profile of biological activity

№ п/п	Пептид	Белок	Uniprot ID	Фермент	Теоретическая активность
Пептиды нута					
	IPPG	Legumin J Legumin J-like	A0A1S3E1N3 A0A1S2XVG1	трипсин + пепсин бромелаин	ACE inhibitor, DPP IV inhibitor, non-ABPs, AHT, Non-Anti-tubercular, AntiCP, Antifungal
	PPR	Provicilin-like Legumin-like Legumin A-like	A0A1S2XYZ0 A0A3Q7XNW1 A0A1S2XSB9	трипсин + пепсин папаин бромелаин	ACE inhibitor, DPP IV inhibitor, non-ABPs, Non-AHT, Non-Anti-tubercular, Non AntiCP, Antifungal
	WSY	Legumin J-like	A0A1S2XVG1	трипсин + пепсин	DPP IV inhibitor, Non-AHT, Non-Anti-tubercular, Non AntiCP, Non-Antifungal
	GTCF	Legumin	Q9SMJ4	протеиназа К	ACE inhibitor, non-ABPs, Non-AHT, Non-Anti-tubercular, AntiCP, Non-Antifungal
	SDRF	Legumin Legumin A-like Legumin-like	Q9SMJ4 A0A1S2XSB9 A0A3Q7XNW1	протеиназа К	ACE inhibitor, DPP IV inhibitor, non-ABPs, Non-AHT, Non-Anti-Anti-tubercular, AntiCP, Antifungal
	GGCF	Legumin A-like	A0A1S2XSB9	протеиназа К	ACE inhibitor, Antioxidative, DPP IV inhibitor, non-ABPs, Non-AHT, Non-Anti-tubercular, AntiCP, Non-Antifungal
	WMF	Legumin Legumin-like	Q9SMJ4 A0A3Q7XNW1	папаин бромелаин	ACE inhibitor, DPP IV inhibitor, non-ABPs, Non-AHT, Non-Anti-tubercular, Non AntiCP, Antifungal
	SNRF	Vicilin-like	A0A1S2XQ88	протеиназа К	ACE inhibitor, DPP IV inhibitor, non-ABPs, Non-AHT, Non-Anti-tubercular, AntiCP, Non-Antifungal
	HYF	Legumin J	A0A1S3E1N3	папаин бромелаин	ACE inhibitor, Antioxidative, DPP IV inhibitor, non-ABPs, Non-AHT, Non-Anti-tubercular, Non AntiCP, Non-Antifungal
	SYF	Provicilin	Q304D4	папаин	ACE inhibitor, Antioxidative, DPP IV inhibitor, non-ABPs, Non-AHT, Non-Anti-tubercular, Non AntiCP, Non-Antifungal
	NHEXXXXXX XXXQQEG	Legumin-like	A0A3Q7XNW1	бромелаин	ACE inhibitor, DPP IV inhibitor, non-ABPs, AHT, Non-Anti-tubercular, Non AntiCP, Non-Antifungal
Пептиды рапса					
1.	GGP	Cruciferin Cruciferin BnC1	P11090 P33523	протеиназа К	ACE inhibitor, Antithrombotic, Antioxidative, DPP IV inhibitor, non-ABPs, Non-AHT, Non-Anti-tubercular, Non AntiCP, Non-Antifungal
2.	QQQF	Cruciferin CRU4	P33522	протеиназа К	ACE inhibitor, DPP IV inhibitor, non-ABPs, AHT, Non-Anti-tubercular, AntiCP, Non-Antifungal
3.	RGP	Cruciferin CRU1	P33525	протеиназа К	ACE inhibitor, Antithrombotic, Antioxidative, DPP IV inhibitor, non-ABPs, Non-AHT, Non-Anti-tubercular, Non AntiCP, Antifungal
4.	RCSGF	Cruciferin CRU4	P33522	протеиназа К	ACE inhibitor, DPP IV inhibitor, non-ABPs, Non-AHT, Non-Anti-tubercular, Non AntiCP, Antifungal
5.	MPR	Cruciferin CRU4	P33522	папаин бромелаин	ACE inhibitor, DPP IV inhibitor, non-ABPs, Non-AHT, Non-Anti-tubercular, Non AntiCP, Antifungal
6.	QWR	Cruciferin CRU1	P33525	папаин	DPP IV inhibitor, ABPs, Non-AHT, Non-Anti-tubercular, Non AntiCP, Antifungal
7.	MPG	Napin Napin-2 Napin-B Napin embryospecific Napin-3 Napin-1	P17333 P01090 P27740 P09893 P80208 P01091	папаин	ACE inhibitor, Antithrombotic, DPP IV inhibitor, non-ABPs, Non-AHT, Non-Anti-tubercular, Non AntiCP, Antifungal
8.	WIEF	Cruciferin Cruciferin BnC1 Cruciferin BnC2	P11090 P33523 P33524	папаин бромелаин	ACE inhibitor, DPP IV inhibitor, non-ABPs, Non-AHT, Anti-tubercular, AntiCP, Non-Antifungal
9.	CQQWL	Napin Napin-2 Napin-B Napin embryospecific Napin-3 Napin1	P17333 P01090 P27740 P09893 P80208 P01091	бромелаин	ACE inhibitor, DPP IV inhibitor, non-ABPs, AHT, Non-Anti-tubercular, Non AntiCP, Non-Antifungal
10.	CQQWIR	Napin-1A	P24565	бромелаин	ACE inhibitor, Antioxidative, DPP IV inhibitor, non-ABPs, Non-AHT, Non-Anti-tubercular, Non AntiCP, Non-Antifungal
Пептиды конопли					
1.	WSY	Edestin 1	A0A090CXP5 A0A090CXP7 A0A090DLH8	трипсин + пепсин	ACE inhibitor, Antioxidative, DPP IV inhibitor, non-ABPs, Non-AHT, Non-Anti-tubercular, Non AntiCP, Non-Antifungal
2.	SWN	Edestin 3	A0A219D2X4	трипсин + пепсин	Antioxidative, DPP IV inhibitor, non-ABPs, Non-AHT, Non-Anti-tubercular, Non AntiCP, Non-Antifungal
3.	GCP	Edestin 1	A0A090CXP5 A0A090CXP7 A0A090DLH8 A0A090CXP9 A0A090DLI7 A0A090CXP8	протеиназа К	Antioxidative, non-ABPs, Non-AHT, Non-Anti-tubercular, Non AntiCP, Non-Antifungal
4.	GQKCF	Edestin 1	A0A090CXP5 A0A090CXP7 A0A090DLH8	протеиназа К	ACE inhibitor, non-ABPs, AHT, Non-Anti-tubercular, Non AntiCP, Antifungal

Таблица 2. Окончание / Table 2. End

№ п/п	Пептид	Белок	Uniprot ID	Фермент	Теоретическая активность
5.	SHACF	Edestin 2	A0A090CXP9 A0A090CXP8	протеиназа К	ACE inhibitor, DPP IV inhibitor, non-ABPs, AHT, Non-Anti-tubercular, AntiCP, Non-Antifungal
6.	SRRF	Edestin 2	A0A090CXP9 A0A090DLI7 A0A090CXP8	протеиназа К	ACE inhibitor, DPP IV inhibitor, non-ABPs, Non-AHT, Non-Anti-Anti-tubercular, AntiCP, Antifungal
7.	HGRF	Albumin	A0A219D1L6	протеиназа К	ACE inhibitor, non-ABPs, Non-AHT, Non-Anti-tubercular, AntiCP, Non-Antifungal
8.	MYMR	Albumin	A0A219D1L6	папаин бромелаин	ACE inhibitor, Antioxidative, DPP IV inhibitor, non-ABPs, AHT, Anti-tubercular, AntiCP, Antifungal
9.	QCQF	Edestin 2	A0A090CXP9 A0A090DLI7 A0A090CXP8	бромелаин	ACE inhibitor, non-ABP, Non-AHT, Non-Anti-tubercular, Non AntiCP, Antifungal
10.	MYG	Edestin 3	A0A219D2X4	бромелаин	ACE inhibitor, Antioxidative, DPP IV inhibitor, Non-AHT, Non-Anti-tubercular, Non AntiCP, Antifungal
11.	SVCF	Edestin 2	A0A090CXP8 A0A219D3H6	папаин	ACE inhibitor, DPP IV inhibitor, non-ABPs, Non-AHT, Non-Anti-tubercular, Non AntiCP, Antifungal
12.	MCG	Albumin	A0A219D1L6	бромелаин	non-ABPs, Non-AHT, Non-Anti-tubercular, Non AntiCP, Antifungal

4. Выводы

Текущее исследование направлено на определение биологической активности пептидов, образующихся в ходе теоретического гидролиза белков нута, рапса и конопли с использованием ферментов трипси-на + папаина, протеиназы К, бромелаина и папаина. Для белков нута было получено суммарно 10 131 аминокислотная последовательность, 7 206 — для белков рапса и 8 479 — для белков конопли. В ходе прогнозирования потенциальной биологической активности в PeptideRanker, токсичности, аллергенности и горечи было получено 35 БАП из белков нута, 21 БАП из белков рапса и 22 БАП из белков конопли. Для белков нута было предсказано 29 потенциальных ингибиторов АПФ, 27 ингибиторов DPP IV, 6 онкостатических, 4 антиоксидантных, 4 противогрибковых пептида и 3 антигипертензивных. Среди пептидов рапса определено 22 потенциальных ингибитора DPP IV и 20 ингибиторов

АПФ, 5 с противогрибковой активностью, 3 пептида с потенциальным антиоксидантным эффектом, 3 с антитромботическими свойствами, 2 антигипертензивных пептида, 2 с онкостатическими свойствами и 1 с антибактериальной активностью. Для 16 пептидов конопли предсказана потенциальная АПФ-ингибирующая активность, 15 являются ингибиторами DPP IV, 7 с противогрибковой активностью, 5 с антиоксидантным и онкостатическим эффектами, 4 с антигипертензивными свойствами, 1 с противотуберкулезным эффектом.

Полученные в ходе *in silico* исследований не токсичные, не горькие и не аллергенные пептиды из нута, рапса и конопли требуют дальнейшей проверки *in vitro* и *in vivo*. Следует учитывать возможные расхождения между результатами *in silico* моделирования гидролиза и оценки биологической активности пептидов и данными экспериментальных исследований.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / REFERENCES

- Du, Z., Comer, J., Li, Y. (2023). Bioinformatics approaches to discovering food-derived bioactive peptides: Reviews and perspectives. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 162, Article 117051. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2023.117051>
- Du, C., Gong, H., Zhao, H., Zhang, L., Wang, P. (2024). Recent progress in the preparation of bioactive peptides using simulated gastrointestinal digestion processes. *Food Chemistry*, 453, Article 139587. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.139587>
- Rivero-Pino, F., Espejo-Carpio, F. J., Guadix, E. M. (2021). Unravelling the α -glucosidase inhibitory properties of chickpea protein by enzymatic hydrolysis and *in silico* analysis. *Food Bioscience*, 44(Part 4), Article 101328. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2021.101328>
- Toldrá, F., Gallego, M., Reig, M., Aristoy, M.-C., Mora, L. (2020). Recent progress in enzymatic release of peptides in foods of animal origin and assessment of bioactivity. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 68(46), 12842–12855. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.9b08297>
- Cermeño, M., Bascón, C., Amigo-Benavent, M., Felix, M., FitzGerald, R. J. (2022). Identification of peptides from edible silkworm pupae (*Bombyx mori*) protein hydrolysates with antioxidant activity. *Journal of Functional Foods*, 92, Article 105052. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2022.105052>
- Song, Y., Ju, J., Song, J., Wang, S., Cao, T., Lio, Z. et al. (2021). The antihypertensive effect and mechanisms of bioactive peptides from *Ruditapes philippinarum* fermented with *Bacillus natto* in spontaneously hypertensive rats. *Journal of Functional Foods*, 79, Article 104411. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2021.104411>
- Villaró-Cos, S., Lafarga, T. (2023). Online tools to support teaching and training activities in chemical engineering: Enzymatic proteolysis. *Frontiers in Education*, 8, Article 1290287. <https://doi.org/10.3389/feduc.2023.1290287>
- Agyei, D., Tsopmo, A., Udenigwe, C.C. (2018). Bioinformatics and peptidomics approaches to the discovery and analysis of food-derived bioactive peptides. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 410, 3463–3472. <https://doi.org/10.1007/s00216-018-0974-1>
- Guo, H., Hao, Y., Yang, X., Ren, G., Richer, A. (2023). Exploration on bioactive properties of quinoa protein hydrolysate and peptides: A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 63(16), 2896–2909. <https://doi.org/10.1080/10408398.2021.1982860>
- Mooney, C., Haslam, N. J., Pollastri, G., Shields, D. C. (2012). Towards the improved discovery and design of functional peptides: Common features of diverse classes permit generalized prediction of bioactivity. *PLoS ONE*, 7(10), Article e45012. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0045012>
- Gallego, M., Toldrá, F., Mora, L. (2022). Quantification and *in silico* analysis of taste dipeptides generated during dry-cured ham processing. *Food Chemistry*, 370, Article 130977. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130977>
- Wiener, A., Shudler, M., Levit, A., Niv, M. Y. (2012). BitterDB: A database of bitter compounds. *Nucleic Acids Research*, 40(D1), D413–D419. <https://doi.org/10.1093/nar/gkr755>
- Minkiewicz, P., Iwaniak, A., Darewicz, M. (2019). BIOPEP-UWM database of bioactive peptides: Current opportunities. *International Journal of Molecular Sciences*, 20(23), Article 5978. <https://doi.org/10.3390/ijms20235978>
- Sharma, N., Patiyal, S., Dhall, A., Pande, A., Arora, C., Raghava, G. P. S. (2021). AllgPred 2.0: An improved method for predicting allergenic proteins and mapping of IgE epitopes. *Briefings in Bioinformatics*, 22(4), Article bbaa294. <https://doi.org/10.1093/bib/bbaa294>
- Lata, S., Mishra, N. K., Raghava, G. P. S. (2010). AntiBP2: Improved version of antibacterial peptide prediction. *BMC Bioinformatics*, 11(Suppl 1), Article S19. <https://doi.org/10.1186/1471-2105-11-S1-S19>
- Rauf, A., Kiran, A., Hassan, M. T., Mahmood, S., Mustafa, G., Jeon, M. (2021). Boosted prediction of antihypertensive peptides using deep learning. *Applied Sciences*, 11(5), Article 2316. <https://doi.org/10.3390/app11052316>
- Manavalan, B., Basith, S., Shin, T. H., Wei, L., Lee, G. (2019). AtbPred: A robust sequence-based prediction of anti-tubercular peptides using extremely randomized trees. *Computational and Structural Biotechnology Journal*, 17, 972–981. <https://doi.org/10.1016/j.csbj.2019.06.024>
- Agrawal, P., Bhagat, B., Mahalwal, M., Sharma, N., Raghava, G. P. S. (2021). AntiCP 2.0: An updated model for predicting anticancer peptides. *Briefings in Bioinformatics*, 22(3), Article bbaa153. <https://doi.org/10.1093/bib/bbaa153>
- Moretta, A., Scieuzo, C., Petrone, A. M., Salvia, R., Manniello, M.D., Falabella, P. (2022). Tools in the era of multidrug resistance in bacteria: Applications for new antimicrobial peptides discovery. *Current Pharmaceutical Design*, 28(35), 2856–2866. <https://doi.org/10.2174/1381612828666220817163339>
- Axentii, M., Codină, G. G. (2024). Exploring the nutritional potential and functionality of hemp and rapeseed proteins: A review on unveiling anti-nutritional factors, bioactive compounds, and functional attributes. *Plants*, 13(9), Article 1195. <https://doi.org/10.3390/plants13091195>
- Kumar, N., Hong, S., Zhu, Y., Garay, A., Yang, J., Henderson, D. et al. (2025). Comprehensive review of chickpea (*Cicer arietinum*): Nutritional significance, health benefits, techno-functionalities, and food applications. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 24(2), Article e70152. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.70152>
- Grasso, N., Lynch, K. M., Arendt, E. K., O'Mahony, J. A. (2022). Chickpea protein ingredients: A review of composition, functionality, and applications. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 21(1), 435–452. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12878>
- Di Francesco, A., De Santis, M. A., Lanzoni, A., Pittalà, M. G. G., Saletti, R., Flagella, Z. et al. (2024). Mass spectrometry characterization of the SDS-PAGE protein profile of legumins and vicilins from chickpea seed. *Foods*, 13(6), Article 887. <https://doi.org/10.3390/foods13060887>
- Shen, P., Yang, J., Nikiforidis, C. V., Mocking-Bode, H. C. M., Sagis, L. M. C. (2023). Rapiferin versus napin — Air-water interface and foam stabilizing properties of rapeseed storage proteins. *Food Hydrocolloids*, 136, Article 108300. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2022.108300>

25. Sun, X., Sun, Y., Li, Y., Wu, Q., Wang, L. (2021). Identification and characterization of the seed storage proteins and related genes of *Cannabis sativa* L. *Frontiers in Nutrition*, 8, Article 678421. <https://doi.org/10.3389/fnut.2021.678421>
26. Al Musaimi, O., Lombardi, L., Williams, D. R., Albericio, F. (2022). Strategies for improving peptide stability and delivery. *Pharmaceuticals*, 15(10), Article 1283. <https://doi.org/10.3390/ph15101283>
27. Wang, L., Wang, N., Zhang, W., Cheng, X., Yan, Z., Shao, G. et al. (2022). Therapeutic peptides: Current applications and future directions. *Signal Transduction and Targeted Therapy*, 7(1), Article 48. <https://doi.org/10.1038/s41392-022-00904-4>
28. Boschin, G., Scigliuolo, G. M., Resta, D., Arnoldi, A. (2014). ACE-inhibitory activity of enzymatic protein hydrolysates from lupin and other legumes. *Food Chemistry*, 145, 34–40. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.07.076>
29. Wang, S., Mouming Zhao, M., Hongbing Fan, H., Wu, J. (2022). Emerging proteins as precursors of bioactive peptides/hydrolysates with health benefits. *Current Opinion in Food Science*, 48, Article 100914. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2022.100914>
30. Hernandez, L. M. R., de Mejia, E. G. (2019). Enzymatic production, bioactivity, and bitterness of chickpea (*Cicer arietinum*) peptides. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 18(6), 1913–1946. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12504>
31. Rivero-Pino, F., Millan-Linares, M. C., Montserrat-De-La-Paz, S. (2023). Strengths and limitations of *in silico* tools to assess physicochemical properties, bioactivity, and bioavailability of food-derived peptides. *Trends in Food Science and Technology*, 138, 433–440. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2023.06.023>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ	AUTHOR INFORMATION
Принадлежность к организации	Affiliation
Гаравири Махмуд — аспирант, кафедра «Биотехнология и биоорганический синтез», Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ) 125080, Москва, Волоколамское шоссе, 11 E-mail: gharaviri@hotmail.com ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4318-7077	Mahmood Gharaviri , Postgraduate, Department «Biotechnology and Bioorganic Synthesis», Russian Biotechnological University (ROSBIOTECH) 11, Volokolamsk highway, 125080, Moscow, Russia E-mail: gharaviri@hotmail.com ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4318-7077
Дегтярев Иван Александрович — аспирант, кафедра «Биотехнология и биоорганический синтез», Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ) 125080, Москва, Волоколамское шоссе, 11 E-mail: Ivand152@yandex.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3842-1391 * автор для контактов	Ivan A. Degtyarev , Postgraduate, Department «Biotechnology and Bioorganic Synthesis», Russian Biotechnological University (ROSBIOTECH) 11, Volokolamsk highway, 125080, Moscow, Russia E-mail: Ivand152@yandex.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3842-1391 * corresponding author
Алексаночкин Денис Игоревич — аспирант, кафедра «Биотехнология и биоорганический синтез», Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ) 125080, Москва, Волоколамское шоссе, 11 E-mail: aleksanochkindi@list.ru ORCID: https://orcid.org/0009-0000-7677-6583	Denis I. Aleksanochkin , Postgraduate, Department «Biotechnology and Bioorganic Synthesis», Russian Biotechnological University (ROSBIOTECH) 11, Volokolamsk highway, 125080, Moscow, Russia E-mail: aleksanochkindi@list.ru ORCID: https://orcid.org/0009-0000-7677-6583
Фоменко Иван Андреевич — кандидат технических наук, доцент, кафедра «Биотехнология и биоорганический синтез», Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ) 125080, Москва, Волоколамское шоссе, 11 E-mail: iv.fomenko@mail.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2478-1705	Ivan A. Fomenko , Candidate of Technical Sciences, Docent, Department «Biotechnology and Bioorganic Synthesis», Russian Biotechnological University (ROSBIOTECH) 11, Volokolamsk highway, 125080, Moscow, Russia E-mail: iv.fomenko@mail.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2478-1705
Машенцева Наталья Геннадьевна — доктор технических наук, профессор РАН, профессор, кафедра «Биотехнология и биоорганический синтез», Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ) 125080, Москва, Волоколамское шоссе, 11 E-mail: natali-mng@yandex.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9287-0585	Natalya G. Mashentseva , Doctor of Technical Sciences, Professor of the Russian Academy of Sciences, Professor, Department «Biotechnology and Bioorganic Synthesis», Russian Biotechnological University (ROSBIOTECH) 11, Volokolamsk highway, 125080, Moscow, Russia E-mail: natali-mng@yandex.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9287-0585
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/10.21323/2618-9771-2025-8-4-479-487>

Поступила 04.09.2025

Поступила после рецензирования 16.10.2025

Принята в печать 20.10.2025

© Федулова Л. В., Кибиткина А. А., Василевская Е. Р., Карабанов С. Ю., Утьянов Д. А., 2025

<https://www.fsjour.com/jour>

Обзорная статья

Открытый доступ

МИКРОНУТРИЕНТЫ И БИОАКТИВНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ В НЕЙРОПРОТЕКЦИИ: ПОТЕНЦИАЛ, МЕХАНИЗМЫ, ИСТОЧНИКИ

Федулова Л. В., Кибиткина А. А., Василевская Е. Р., Карабанов С. Ю.*, Утьянов Д. А.

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

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: АННОТАЦИЯ

витамины, минералы, полиненасыщенные жирные кислоты, нейровоспаление, когнитивные функции

Нутритивная поддержка как стратегия, альтернативная или дополняющая традиционную фармакотерапию, демонстрирует значительный потенциал в модуляции патогенетических механизмов нейродегенеративных и neuropsychiatric расстройств. В данном обзоре обобщены современные данные о роли микронутриентов и биологически активных соединений в нейропротекции и нейрорегуляции. Рассматриваются механизмы действия витаминов (Е, D, К, А, группы В, С), минералов (селена, цинка, магния, железа, меди, йода, марганца), а также полиненасыщенных жирных кислот на модуляцию антиоксидантной защиты, синаптической пластичности, нейровоспаления и метаболизма нейромедиаторов. Особое внимание уделяется их способности снижать окислительный стресс и эксайтотоксичность, одновременно усиливая нейротрофическую поддержку (BDNF, NGF). Подчеркивается значение синергии нутриентов, например, комбинации витамина В12 с омега-3, для усиления нейропротективного эффекта. Обсуждаются проблемы переноса результатов доклинических исследований в клиническую практику, включая вариативность биодоступности и необходимость персонализированного питания. Дальнейшие исследования должны быть направлены на разработку комплексных диетических стратегий и изучение роли кишечной микробиоты в метаболизме нейроактивных соединений.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Исследования проводили в рамках государственного задания ФГБНУ «ФНЦ пищевых систем им. В. М. Горбатова» РАН FGUS-2024-0003.

Received 04.09.2025

Accepted in revised 16.10.2025

Accepted for publication 20.10.2025

© Fedulova L. V., Kibitkina A. A., Vasilevskaya E. R., Karabanov S. Yu., Utyanov D. A., 2025

Available online at <https://www.fsjour.com/jour>

Review article

Open access

MICRONUTRIENTS AND BIOACTIVE COMPOUNDS IN NEUROPROTECTION: POTENTIAL, MECHANISMS, AND DIETARY SOURCES

Liliya V. Fedulova, Anastasiya A. Kibitkina, Ekaterina R. Vasilevskaya,
Sergey Yu. Karabanov*, Dmitry A. Utyanov

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

KEYWORDS:

vitamins, minerals,
polyunsaturated
fatty acids,
neuroinflammation,
cognitive function

ABSTRACT

Nutritional support, as a strategy either alternative or complementary to conventional pharmacotherapy, demonstrates significant potential for modulating the pathogenetic mechanisms of neurodegenerative and neuropsychiatric disorders. This review synthesizes current evidence on the role of micronutrients and bioactive compounds in neuroprotection and neuroregulation. It examines the mechanisms of action of vitamins (E, D, K, A, B complex, C), minerals (selenium, zinc, magnesium, iron, copper, iodine, manganese), and polyunsaturated fatty acids in modulating antioxidant defense, synaptic plasticity, neuroinflammation, and neurotransmitter metabolism. Particular emphasis is placed on their capacity to mitigate oxidative stress and excitotoxicity, while concurrently enhancing neurotrophic support (e. g., BDNF, NGF). The significance of nutrient synergy, exemplified by the combination of vitamin B₁₂ and omega-3 fatty acids, for augmenting neuroprotective effects is highlighted. The review discusses the challenges associated with translating findings from preclinical studies into clinical practice, including variability in bioavailability and the necessity for personalized nutritional approaches. Future research should be directed towards developing comprehensive dietary strategies and elucidating the role of gut microbiota in the metabolism of neuroactive compounds.

FUNDING: The article was published as part of the research topic No. FGUS-2024-0003 of the state assignment of the V. M. Gorbатов Federal Research Center for Food Systems.

1. Введение

Рост распространенности нейродегенеративных (болезни Альцгеймера, Паркинсона) и neuropsychiatric расстройств (депрессия, тревожные расстройства) заболеваний на фоне ограниченной эффективности существующих фармакотерапевтических стратегий обуславливает необходимость поиска альтернативных подходов к профилактике и лечению [1–5].

Наблюдаемый в последнее время рост выявляемости neuropsychiatric расстройств часто связывают с хроническим стрессом, возникающим на фоне современного образа жизни, а также с цифровизацией и социальными факторами. В условиях старения населения и роста глобальной нагрузки, связанной с неврологическими

и психическими расстройствами, поиск эффективных превентивных стратегий становится одной из приоритетных задач систем здравоохранения во всем мире. Это выдвигает на первый план необходимость применения /немедикаментозных, доступных и безопасных методов управления психическим здоровьем, где нутритивная поддержка может играть ключевую роль [6–8].

Различные микронутриенты, обладающие нейропротективным потенциалом, представляют особый интерес в контексте их доступности, многокомпонентного действия и минимальных побочных эффектов [9,10]. Актуальность работы подкрепляется растущим объемом данных о роли окислительного стресса, нейровоспаления и дисфункции нейротрофинов в патогенезе этих заболеваний,

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Федулова, Л. В., Кибиткина, А. А., Василевская, Е. Р., Карабанов, С. Ю., Утьянов, Д. А. (2025). Микронутриенты и биоактивные соединения в нейропротекции: потенциал, механизмы, источники. *Пищевые системы*, 8(4), 479–487. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-4-479-487>

FOR CITATION: Fedulova, L. V., Kibitkina, A. A., Vasilevskaya, E. R., Karabanov, S. Yu., Utyanov, D. A. (2025). Micronutrients and bioactive compounds in neuroprotection: Potential, mechanisms, and dietary sources. *Food Systems*, 8(4), 479–487. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-4-479-487>

а также усилением внимания к превентивной медицине и персонализированному питанию [11,12].

Витамины, минералы и полиненасыщенные жирные кислоты (ПНЖК) выступают ключевыми регуляторами нейροпротективных процессов, влияя на антиоксидантную защиту, синаптическую пластичность, нейровоспаление и метаболизм нейромедиаторов [13]. Кроме того, современные диетические тенденции (например, дисбаланс омега-6/омега-3 жирных кислот) повышают риски дефицита критически важных нутриентов, что делает исследование их коррекции социально значимым [14]. Однако взаимодействие этих нутриентов, их оптимальные дозировки и трансляция доклинических результатов в клиническую практику остаются предметом активных дискуссий.

Несмотря на обнадеживающие доклинические данные, внедрение микронутриентов в клиническую практику осложняется следующими проблемами: вариабельность их биодоступности, неоднозначность результатов рандомизированных исследований и необходимость подбора персонализированных комбинаций [15]. Перспективным направлением является синергия нутриентов (например, витамина B12 с омега-3), усиливающая нейротрофическую поддержку [16,17].

Цель данной работы — систематизировать современные данные о роли микронутриентов и жирных кислот в нейропротекции и нейрорегуляции, оценить потенциал их комплексного применения и обозначить направления для дальнейших исследований в области нутритивной терапии неврологических заболеваний.

2. Объекты и методы

Настоящая обзорная статья основана на анализе данных, полученных из рецензируемых научных публикаций за период 2000–2024 гг. Поиск литературы проводился в электронных базах данных PubMed, ScienceDirect, Web of Science и Scopus с использованием ключевых слов: нейропротекция, микронутриенты, витамины группы B, омега-3 жирные кислоты, селен, нейровоспаление, эксайтотоксичность, BDNF, гематозенцефалический барьер.

Критерии включения:

1. Статьи, посвященные роли микронутриентов (витамины, минералы) и ПНЖК в модуляции функций ЦНС.
2. Доклинические исследования на моделях нейродегенеративных заболеваний (*in vitro*, *in vivo*).
3. Клинические испытания (рандомизированные контролируемые, когортные), метаанализы и систематические обзоры.
4. Публикации с высоким импакт-фактором (Q1–Q2 в Scopus) и открытым доступом к полным текстам.

Критерии исключения:

1. Нерецензируемые источники (препринты, диссертации, материалы конференций без *peer-review*).
2. Исследования с методологическими ограничениями (малая выборка, отсутствие контрольной группы).
3. Работы, посвященные исключительно фармакологическим препаратам без акцента на нутриенты.

Метаданные о питательных веществах и других компонентах основных продуктов питания с учетом количества образцов, места отбора проб, даты сбора, использованных аналитических методов были собраны с помощью следующих баз данных: FoodData Central, Международная сеть систем данных о продуктах питания (INFOODS) и «Химический состав продуктов, используемых в Российской Федерации».

3. Витамины

Витамины — жизненно необходимые микроэлементы, которые важны для метаболических процессов, синтеза ферментов и гормонов, поддерживающие иммунную систему и способствующие снижению риска инфекционных заболеваний, кроме того, они участвуют в нейрогенезе, защите нейронов, поддержании их выживания и в передаче нервных импульсов. Их дефицит приводит к нарушениям функций мозга, таким как окислительный стресс, митохондриальная дисфункция, накопление белков (синуклеина, Aβ-бляшек), нейродегенерация и эксайтотоксичность [18].

Витамин Е. Было показано, что добавки витамина Е защищают нейроны от окислительного стресса, улучшают память, когнитивные способности, обучаемость, двигательные функции и уменьшают отложение бета-амилоида и гиперфосфорилирование тау-белка на экспериментальных моделях нейродегенеративных заболеваний [19,20]. Встречающийся в природе витамин Е существует в восьми химических формах (альфа-, бета-, гамма- и дельта-токоферол и альфа-, бета-, гамма- и дельта-токотриенол), которые обладают различными уровнями биологической активности [21]. Альфа- (или

α-) токоферол — единственная форма, которая признана отвечающей потребностям человека. Продукты, богатые витамином Е — это орехи и семена, цельные зерна и растительные масла, такие как кукурузное, соевое и сафлоровое. Однако чрезмерное потребление этих масел не рекомендуется, поскольку это может привести к искажению соотношения омега-6/омега-3 жирных кислот в рационе, смещая баланс в сторону потенциально провоспалительных эффектов омега-6. Листовые зеленые овощи также содержат значительное количество витамина Е [21]. При дефиците α-токоферола наблюдаются гемолиз эритроцитов, неврологические нарушения. Потребность в витамине Е возрастает с увеличением потребления ПНЖК и степенью их ненасыщенности, составляя 0,4–0,6 мг ток. экв. α-токоферола на каждый 1 г ПНЖК.

Согласно рекомендациям Роспотребнадзора, физиологическая потребность в витамине Е для взрослых составляет 15 мг ток. экв. в сутки [1].

Витамин D (кальциферол) — жирорастворимый витамин, принадлежит к семейству стероидных агентов, присутствует в двух различных формах, а именно: эргокальциферол и холекальциферол, D2 и D3 соответственно. Обе формы участвуют не только в регуляции обмена кальция и фосфора в организме, но также обладают рядом нейропротективных свойств, которые способствуют защите нервной системы от повреждений и дегенеративных изменений [22].

Данный витамин оказывает нейропротекторное действие, способствует снижению окислительного стресса и митохондриальной дисфункции, увеличивает выработку нейротрофических факторов (NGF и BDNF), что способствует нейропластичности, росту аксонов и синаптической передаче [23].

Витамин D способствует снижению воспаления микроглии. В зависимости от состояния активации микроглию можно разделить на два фенотипа: провоспалительную (M1) и противовоспалительную (M2). Микроглия M1 в основном секретирует воспалительные цитокины (TNF-α, IL-1β и IL-6), а также супероксид и активные формы кислорода, тогда как микроглия M2 в основном секретирует противовоспалительные цитокины (IL-4, IL-13, IL-10 и TGF-β). Витамин D снижает выработку провоспалительных факторов и способствует выработке противовоспалительных, способствуя изменению фенотипа микроглии с M1 на M2, тем самым снижая воспалительную реакцию [24,25].

Благодаря своей противовоспалительной и антиоксидантной активности, а также влиянию на морфологию нейронов, витамин D может быть эффективным средством в профилактике и лечении нейродегенеративных заболеваний, таких как болезнь Альцгеймера и болезнь Паркинсона [26,27].

Рекомендуемая Роспотребнадзором физиологическая доза для детей витамина D составляет от 10 до 15 мкг/сутки, для взрослых — 15 мкг/сутки (600 МЕ), для лиц старше 65 лет — 20 мкг/сутки (800 МЕ)¹.

Витамин К — общее название группы незаменимых органических соединений. В природе обнаружено два семейства витаминов группы К: филлохиноны (витамины K1, обнаружены в растениях) и менахиноны (витамины K2 — в животных и бактериях). Другие его формы (K3–K7) являются синтетическими аналогами природного соединения [28].

Витамин К необходим для свертывания крови, здоровья костей и нормального функционирования ЦНС, играет ключевую роль в выживании нейронов, пролиферации и хемотаксисе. Исследователи связывают витамин К с когнитивной функцией: здоровые его уровни способствуют адекватному усвоению новой информации и улучшению работы долгосрочной памяти [29].

Механизмы нейропротекторного действия витамина К основаны на его антиоксидантном потенциале и противовоспалительном действии, а также на регуляции различных биологических мишеней.

Согласно многочисленным исследованиям [30–32], витамин К, особенно представители семейства K2 (менахиноны), проявляет выраженные антиоксидантные и противовоспалительные свойства, способствуя защите нейронов от окислительного стресса и воспаления — ключевых факторов нейродегенеративных процессов.

Филлохиноны способствуют предотвращению клеточной смерти путем ингибирования накопления цитотоксических активных форм кислорода в незрелых кортикальных нейронах и первичных олигодендрокитах посредством ингибирования активации 12-липоксигеназы. Последняя частично отвечает за метаболизм арахидоновой кислоты, высвобождаемой из мембранных фосфолипидов [33].

¹ МР 2.3.1.0253-21 «Нормы физиологических потребностей в энергии и пищевых веществах для различных групп населения Российской Федерации» (утв. Федеральной службой по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека 22 июля 2021 г.). Москва: 2021. — 72 с.

Противовоспалительная функция заключается в способности ингибировать высвобождение цитокинов интерлейкина (IL-6), фактора некроза опухоли (TNF)- α и IL-1 β в макрофагоподобных клетках [34].

Витамин К способствует активации экспрессии генов, кодирующих фактор дифференцировки роста 15 (GDF15) и стanniокальцин 2 (STC2). GDF15 является важным белком, который влияет на клеточную пролиферацию, адгезию и рост, в то время как STC2 стимулирует нейрональную дифференцировку в нейральных стволовых клетках, что способствует развитию нейропротекторного эффекта [35,36].

Физиологическая потребность для детей — от 30 до 120 мкг/сутки, для взрослых — 120 мкг/сутки¹.

Витамин А представляет собой группу жирорастворимых соединений, включающих ретиноиды животного происхождения (ретинол и его производные) и каротиноиды растительного происхождения (органические пигменты с провитаминовой и антиоксидантной активностью). Основными биологически активными формами витамина А являются 11-цис-ретиноаль и транс-ретиноевая кислота [37].

Каротиноиды, такие как β -каротин, α -каротин, лютеин, ликопин и криптоксантин, относятся к тетратерпеноидам, в отличие от производных ретинола, обладают не только провитаминовой, но и антиоксидантной активностью. Стоит отметить, что не все каротиноиды могут превращаться в витамин А: только те из них, которые содержат незамещенное β -иононовое кольцо (например, β -каротин), способны метаболизироваться в ретинол. Таким образом, витамин А существует в различных формах, каждая из которых выполняет специфические биологические функции, включая поддержание зрения, регуляцию генной экспрессии, антиоксидантную защиту; также он необходим для развития нейронов, синаптической пластичности и нейропротекции [38].

Витамин А способствует поддержанию когнитивных функций и помогает защитить нервную систему. Его роль подчеркивается в контексте профилактики и поддерживающей терапии нейродегенеративных заболеваний, таких как болезнь Альцгеймера, Паркинсона и рассеянный склероз. Нейропротекторное действие витамина А связано с его способностью снижать окислительный стресс и воспаление, которые являются ключевыми факторами повреждения нейронов и прогрессирования заболеваний [39].

Нейтрализуя свободные радикалы, ретиноевая кислота защищает нейроны от окислительного повреждения — ключевого патогенетического фактора нейродегенеративных заболеваний. Одновременно модулируя иммунный ответ, она снижает интенсивность нейровоспалительных процессов, что имеет особое значение при болезни Альцгеймера, при которой нарушение ретиноевой сигнализации ассоциировано с аккумуляцией β -амилоидных бляшек. Экспериментальные данные свидетельствуют, что коррекция уровня витамина А может уменьшать амилоидогенез и улучшать когнитивные показатели [40].

При болезни Паркинсона ретиноевая кислота демонстрирует нейропротекторный потенциал за счет регуляции синтеза дофамина и повышения жизнеспособности дофаминергических нейронов. Ее способность снижать окислительный стресс и одновременно стимулировать дофаминергическую передачу открывает перспективы для разработки новых терапевтических стратегий. Таким образом, ретиноевая кислота является многофункциональным регулятором нервной системы, играя роль как в обеспечении базовых нейрофизиологических процессов, так и в профилактике и терапии нейродегенеративных заболеваний [41].

Физиологическая потребность для мужчин — 900 мкг рет. экв./сутки, для женщин — 800 мкг рет. экв./сутки. Физиологическая потребность для детей — от 400 до 1000 мкг рет. экв./сутки¹.

Витамин В12, отдельно или в сочетании с омега-3 жирными кислотами, усиливает выработку нейротрофинов мозга, таких как BDNF и NGF, улучшает когнитивные функции и поддерживает восстановление нервов и функций после черепно-мозговой травмы [16,42,43].

Тиамин (В1), холин (В4), пиридоксин (В6) и кобаламин (В12) необходимы для поддержания здоровой нервной системы, а их дефицит связан с различными неврологическими заболеваниями. Эти витамины могут улучшать определенные неврологические состояния даже при отсутствии доказанного дефицита микроэлементов [18,44].

Взаимодействие между пиридоксином и кобаламином в цикле метионина, а также их участие в цикле лимонной кислоты с другими витаминами группы В, включая тиамин, свидетельствуют о биохимической взаимосвязи этих трех витаминов [45,46]. Действительно, выявлена значительная связь между когнитивными нарушениями и дисфункцией метионин-гомоцистеинового цикла, на которую указывают низкие уровни витаминов В6 и В12 [44,46,47]. Данные сви-

детельствуют о том, что значительная часть населения страдает от дефицита одного или нескольких из этих нейротропных витаминов группы В. Млекопитающие не способны синтезировать витамины группы В самостоятельно; следовательно, они должны получать их в достаточных количествах с пищей. Хотя большинство из них вырабатывается растениями, они могут поступать в организм косвенно через продукты животного происхождения, такие как мясо, молочные продукты и яйца. Единственный витамин В12 вырабатывается не растениями, а бактериями, которые колонизируют переднюю кишку жвачных животных или толстую кишку человека, и поэтому его можно найти только в продуктах животного происхождения, таких как печень, рыба, яйца или молочные продукты. Согласно рекомендациям, суточная потребность в витаминах группы В для взрослых составляет: В1–1,5 мг/сутки или 0,6 мг/1000 ккал; В4–500 мг/сутки; В6–2,0 мг/сутки; В12–3,0 мкг/сутки¹.

Витамин С играет важную роль в модуляции синтеза и высвобождения нейромедиаторов в головном мозге. Функции витамина С в головном мозге включают действие в качестве кофактора дофамин-бета-гидроксилазы при превращении дофамина в норадреналин. Этот витамин участвует в модуляции как дофаминергической, так и глутаматергической нейротрансмиссии, и регулирует высвобождения катехоламинов и ацетилхолина из синаптических пузырьков. Витамин С также обладает антиоксидантными свойствами, способствующими защите головного мозга от эксайтотоксичности глутамата и от повреждений из-за ишемически-реперфузионного воздействия [48,49]. Доклинические исследования показывают, что витамин С улучшает биомаркеры нейропротекции и функциональные исходы на моделях острого неврологического повреждения. Однако клинические исследования не всегда демонстрировали пользу, ориентированную на пациента, возможно, из-за более низких доз, использованных в испытаниях [50,51].

Физиологическая потребность для взрослых составляет 100 мг/сутки¹.

Витамины, особенно Е, В12 и С, играют важную роль в качестве нейрорегуляторов, оказывая нейропротекторное действие и улучшая когнитивные функции. Хотя доклинические исследования показывают многообещающие результаты, внедрение этих результатов в клиническую практику требует дальнейшего изучения, особенно в отношении оптимальной дозировки и долгосрочных эффектов. Сочетание витаминов с другими питательными веществами, такими как омега-3 жирные кислоты, может усилить их нейрорегуляторный эффект, что указывает на потенциальную комплексную диетотерапию для лечения неврологических и нейродегенеративных заболеваний.

4. Минералы

Селен является важным микроэлементом, необходимым для правильного функционирования селенопротеинов, участвующих в антиоксидантной защите мозга и нервной системы. Селен важен для правильного синтеза и метаболизма гормонов щитовидной железы (посредством йодтиронин-дейодиназы, содержащей селен), способствует снижению воспалительных реакций, модулирует активность серотонинергической, дофаминергической и норадренергической систем, снижая риск развития депрессии [52].

Нейромодулирующая роль селена проявляется, в частности, снижением концентрации нейротрофического фактора BDNF, широко связанного с патофизиологией большого депрессивного расстройства [53].

В работе [54] показано, что введение некоторых селеноорганических соединений (м-трифторметилдифенилдиселенид) способствует снижению симптомов депрессии, измеряемых по времени неподвижности в тесте принудительного плавания у мышей, что указывает на потенциальный антидепрессивный эффект селена. Кроме того, селен контролирует защиту дофаминергических нейронов от окислительного стресса посредством селенопротеина, тем самым обеспечивая защиту от нейродегенерации [55].

Тем не менее, в работе [56] было исследовано влияние сывороточного селена на PPAR- γ и выбранные провоспалительные цитокины (IL-1 β , IL-6, TNF- α) в отношении симптомов депрессии и ожирения у женщин среднего возраста. Было показано, что изменение уровней селена не оказало влияния на симптомы депрессии.

Согласно методическим рекомендациям, физиологическая потребность для взрослых составляет 55 мкг/сутки для женщин, 70 мкг/сутки для мужчин. Продуктами, наиболее богатыми селеном, являются бразильские орехи, морепродукты (тунец, сардины, креветки), мясо (говядина, свинина, курица), яйца, молоко, чечевица, шпинат [57].

Цинк необходим для многих биохимических и физиологических процессов, связанных с ростом и функционированием мозга, а также с клеточным метаболизмом. Это вещество играет роль в синтезе

ДНК и делении клеток, в иммунологических функциях, в синтезе белка и в заживлении ран [58]. В гиппокампе и коре головного мозга ионы цинка регулируют синаптическую передачу и действуют как нейротрансмиттеры, модулируя многие лиганд- и потенциал-зависимые ионные каналы. Нарушение гомеостаза цинка в этих регионах связано со многими нарушениями когнитивной, поведенческой и эмоциональной регуляции посредством механизмов снижения нейрогенеза и пластичности нейронов [59].

Цинк оказывает влияние на серотонинергические рецепторы, вызывая антидепрессантоподобные свойства, которые наблюдаются как в доклинических, так и в клинических исследованиях [60]. Дефицит цинка также связан с эндокринным путем развития депрессии. В исследовании [61] указывается, что диета с дефицитом цинка вызывала высокий уровень концентрации кортизола в сыворотке крови у крыс. В свою очередь, постоянно высокие уровни кортизола вовлечены в развитие депрессии из-за гиперактивности гипоталамо-гипофизарно-надпочечниковой оси.

Антиоксидантные и противовоспалительные механизмы цинка рассматриваются как возможная основа его антидепрессивного эффекта. Предыдущие исследования показали, что уровень С-реактивного белка у людей снижается при приеме добавок с содержанием цинка, который обладает профилактическими свойствами против перекисного окисления липидов [62]. Текущее исследование подтверждает связь между развитием депрессии в тяжелой степени и перекисным окислением липидов [63], указывая на то, что антиоксидантное действие цинка способствует антидепрессивному эффекту.

Наконец, роль цинка как антагониста глутаматергического рецептора N-метил-D-аспартата (NMDA) и его участие в пути L-аргинин-оксид азота в качестве ингибитора синтазы оксида азота могут быть связаны с его предполагаемыми антидепрессивными свойствами. Поскольку гомеостаз глутамата и нейротрансмиссия нарушаются у людей с депрессией, терапевтическое воздействие NMDA применялось при лечении депрессии во время клинических и доклинических исследований [64]. Согласно методическим рекомендациям, физиологическая потребность в цинке для взрослых составляет 12 мг/сутки. Всемирная организация здравоохранения рекомендует для мужчин 11 мг/сутки и для женщин 8 мг/сутки.

Больше всего цинка содержат морепродукты, в частности устрицы. Цинк также содержится в мясе, рыбе, яйцах и молочных продуктах, незначительное количество содержится в фасоли, орехах и цельнозерновых продуктах [57].

Магний является важным макроминералом в рационе питания, выполняющим множество функций в организме человека, включая роль кофактора в более чем 300 ферментативных реакциях. В нервной системе магний важен для оптимальной передачи нервных импульсов и нервно-мышечной координации, а также служит для защиты от эксайтотоксичности (чрезмерного возбуждения, приводящего к гибели клеток) [65,66]. Одна из основных неврологических функций магния связана с его взаимодействием с N-метил-D-аспартатным (NMDA) рецептором. Магний блокирует кальциевые каналы в NMDA-рецепторе и должен быть выведен из организма, чтобы могла происходить глутаматергическая возбуждающая передача сигналов [67].

Теоретически низкий уровень магния может усиливать глутаматергическую нейротрансмиссию, создавая благоприятную среду для эксайтотоксичности, которая может привести к окислительному стрессу и гибели нейронов [68]. Аномальная глутаматергическая нейротрансмиссия связана со многими неврологическими и психическими расстройствами [69], включая мигрень, хроническую боль, эпилепсию, болезнь Альцгеймера, болезнь Паркинсона и инсульт, а также депрессию и тревожность, которые часто сопутствуют этим неврологическим расстройствам. Молекулярные исследования и исследования на животных показали, что предварительная обработка магнием защищает нейроны [70,71]. Уточненная физиологическая потребность в магнии для взрослых составляет 420 мг/сутки.

Больше всего магния содержится преимущественно в продуктах растительного происхождения, среди них семена тыквы, семена чиа, миндаль, шпинат, кешью, арахис [57].

Железо участвует в процессах нейротрансмиссии опосредованно, через синтез нейротрансмиттеров, поддержание энергетического баланса и антиоксидантной защиты.

Железо является кофактором гидроксилаз ароматических аминокислот (фенилаланин, тирозин, триптофан). Активность этих ферментов является лимитирующим этапом в синтезе дофамина, серотонина и косвенно норадреналина. Последний будет способствовать выработке нейротрофического фактора мозга. Баланс этих трех нейромедиаторов определяет наличие депрессивного синдрома. Желе-

зо также участвует в синтезе миелина и метаболизме нейротропных нейронов и может играть важную роль в эмоциональном поведении и нейропластичности [72,73].

Железо играет ключевую роль в энергетическом обмене клеток, особенно в высокоактивных нейронах, которые требуют постоянного наличия аденозинтрифосфата. Железо входит в состав митохондриальных белков, участвующих в дыхательной цепи и цикле трикарбоновых кислот. Цитохром С оксидаза является конечным ферментом железа в дыхательной цепи, и его активность отражает нейронный метаболизм [74].

Железо является кофактором ферментов антиоксидантной защиты, которые обезвреживают активные формы кислорода, особенно перекиси водорода. В мозге, где высокий уровень окислительного метаболизма, эти ферменты критически важны для нейропротекции. Также железо необходимо для работы каталазы и пероксидаз [75,76].

Наиболее богатыми животными источниками железа в рационе являются постное мясо и морепродукты, растительными — орехи, бобы, овощи [57].

Медь необходима для нормального функционирования головного мозга, она играет ключевую роль в поддержании окислительно-восстановительного баланса, является важным кофактором в реакциях переноса электронов и необходимым микроэлементом для человека. Медь важна для синтеза нейротрансмиттеров, миелинизации и антиоксидантной защиты. Она также может взаимодействовать с прионными белками для защиты нейронов, модулируя рецепторы NMDA через S-нитрозилирование, снижая эксайтотоксичность [77,78].

Медь выступает кофактором ряда ферментов, участвующих в синтезе нейротрансмиттеров, включая дофамин-β-гидроксилазу, катализирующую превращение дофамина в норадреналин, и пептидилглицин-α-гидроксилирующую монооксигеназу, обеспечивающую активацию нейропептидов [79,80].

Медь высвобождается в синаптическую щель во время нейрональной деполяризации и может модулировать активность рецепторов нейротрансмиттеров (например, рецепторов NMDA, AMPA, GABA), влияя на синаптическую возбудимость и передачу нервного импульса [81].

Богатыми источниками меди являются моллюски, семена и орехи, а также мясные субпродукты, пшеничные отруби, цельнозерновые продукты и шоколад [57].

Йод — важный микроэлемент, необходимый для синтеза гормонов щитовидной железы (трийодтиронин и тироксин), которые играют ключевую роль в развитии и функционировании центральной нервной системы. Дефицит йода приводит к тяжелым неврологическим нарушениям, а его достаточное потребление способствует поддержанию нейротрансмиссии через несколько механизмов.

Во время беременности йод способствует миелинизации нервных волокон у плода, что впоследствии обеспечивает быструю и эффективную передачу нервных импульсов. В раннем возрасте йод важен для дифференцировки нейронов, а также для более эффективного построения синаптических связей, крайне важных в процессе обучения [82,83].

Трийодтиронин активирует митохондриальный биогенез и окислительное фосфорилирование, обеспечивая нейроны энергией (АТФ). Исследования показывают, что трийодтиронин может быстро и напрямую повышать эффективность окислительного фосфорилирования в митохондриях, особенно в тканях печени и мозга [84].

Трийодтиронин способствует повышению активности антиоксидантных ферментов. В экспериментах на животных и клеточных моделях введение данного гормона приводило к увеличению активности супероксиддисмутазы и каталазы, что указывает на антиоксидантную защиту. Также прямое воздействие йода (в форме йодида) может нейтрализовывать активные формы кислорода, что также обеспечивает антиоксидантную защиту клеток головного мозга [85].

Трийодтиронин регулирует экспрессию генов, связанных синаптической пластичностью. Исследования на животных с гипотиреозом показали снижение экспрессии белков, участвующих в синаптической пластичности, таких как нейрогранин (RC3), Rhes и CaMKII. Введение трийодтиронина нормализовывало их уровень, что указывает на прямое влияние гормона на синаптические процессы мозга [86,87]. Трийодтиронин укрепляет ГЭБ, снижая проникновение нейротоксинов, а также способствует подавлению провоспалительных цитокинов [88].

Морские водоросли (такие как ламинария, нори, комбу и вакаме) — одни из лучших пищевых источников йода. Много йода содержится в рыбе и морепродуктах, а также в яйцах [57].

Марганец — микроэлемент, необходимый для нормальной работы мозга, участвует в антиоксидантной защите, синтезе нейромедиаторов и энергетическом метаболизме.

Марганец принимает участие в антиоксидантной защите мозга посредством марганец-зависимой супероксиддисмутазы. Это фермент в мозге, защищающий клетки от окислительного стресса, особенно в условиях гипоксии или воспаления, локализуется в митохондриях, способствует нейтрализации супероксидного радикала [89,90].

Марганец необходим для нормального метаболизма нейротрансмиттеров, таких как глутаминсинтетаза и аргиназа. Первый важен для превращения глутамата в глутамин, что способствует снижению эксайтотоксичности, второй участвует в синтезе мочевины и полиаминов, важных для нейропластичности [91,92].

Марганец участвует в активации ферментов цикла Кребса, а именно пируваткарбоксилазы и изоцитратдегидрогеназы — ключевых ферментов глюконеогенеза и синтеза нейротрансмиттеров [93].

Марганец присутствует в самых разных продуктах питания, включая цельнозерновые продукты, моллюски, устрицы, мидии, орехи, сою и другие бобовые, рис, листовые овощи, кофе, чай и специи [57].

5. Жирные кислоты

Следующим важным компонентом питания являются жиры. К нейрорегуляторным относят длинноцепочечные полиненасыщенные жирные кислоты (ПНЖК), которые содержат 18 или более атомов углерода и две или более двойных связей и классифицируются как омега-3 или омега-6 в зависимости от количества атомов углерода. К числу наиболее значимых ПНЖК относятся докозагексаеновая (DHA), арахидоновая (ARA), α -линоленовая (ALA), линолевая кислота (LA) и эйкозапентаеновая кислота (EPA). При этом ALA и LA являются незаменимыми жирными кислотами (ЖК) для человека, поскольку они являются предшественниками других представителей семейств омега-3 и омега-6.

ПНЖК составляют около 35 % от общего количества липидов мозга, и непосредственно высокие концентрации DHA и ARA и имеют обширную фундаментальную роль в биохимии мембран, воспалении, развитии и поддержании нейронов [94,95]. Данные кислоты при транспортировке в мозг встраиваются в клеточные мембраны, включая мембраны нейронов и глиальных клеток. В микроглии после высвобождения из мембраны фосфолипазой ARA может быть преобразована в простагландины, которые способствуют передаче провоспалительных сигналов. В нейронах DHA присутствует в высоком количестве в виде фосфатидилсерина, и здесь он способствует транслокации и последующей активации протеинкиназ, которые играют роль в нейрогенезе. Помимо этого, в нейронах DHA и/или его медиатор нейротрофактин D1 смешают процессинг белка-предшест-

венника амилоида- β , что нивелирует дисфункции и гибели нейронов при болезни Альцгеймера [95–98].

Омега-3 и омега-6 полиненасыщенные жирные кислоты участвуют в нейрогенезе гиппокампа, влияя на передачу сигналов, зависящих от нейротрофического фактора мозга (BDNF), белка, связывающего элементы реакции на циклический аденозинмонофосфат, и молекулы клеточной адгезии (CaM). Эти сигнальные пути играют ключевую роль в развитии и регуляции депрессивных расстройств [99]. Дефицит ПНЖК связан с изменениями в глутаматной, серотонинергической, норэпинефриновой и дофаминергической нейротрансмиссии, а также в лимбико-гипоталамо-гипофизарно-надпочечниковой оси. Кроме того, жирные кислоты омега-6 обладают провоспалительным действием, и была описана двунаправленная межмолекулярная взаимосвязь между расстройствами настроения и воспалением, включающая большое количество маркеров иммунной системы [100,101].

По данным ВОЗ, минимальные значения потребления незаменимых ЖК для предотвращения симптомов дефицита оцениваются на следующих уровнях: 2,5 % ежедневного потребления энергии должно поступать в виде LA, а 0,5 % ежедневного потребления энергии должно поступать в виде ALA [101]. Выбор типа источников для производства липидов имеет решающее значение для получения адекватного соотношения омега-3 и омега-6 [102]. Для роста нейронов и развития мозга баланс между метаболитами ПНЖК омега-6 и омега-3 должен быть близок к 1:1 или 2:1, что согласуется с данными эволюционных аспектов питания, генетики и исследований [103]. Предшественники, особенно молекулы, относящиеся к подклассу омега-6 ПНЖК, в значительных количествах содержатся в продуктах растительного происхождения, включая водоросли и микроводоросли, фрукты, семена и масла [102].

6. Систематизация данных о нейротропных свойствах микронутриентов и их источниках

Проведенный анализ данных демонстрирует, что эффективные нейротропные свойства достигаются за счет синергического действия широкого спектра микронутриентов, каждый из которых вносит свой значимый вклад в поддержание когнитивных функций. Рассмотренные микронутриенты и биоактивные соединения демонстрируют многогранный нейротропный потенциал, из чего следует, что стратегия питания, направленная на поддержание здоровья мозга, должна основываться на регулярном потреблении разнообразных продуктов, обеспечивающих поступление комплекса необходимых веществ. Для наглядного сопоставления пищевых источников и их ключевых эффектов данные систематизированы в Таблице 1.

Таблица 1. Пищевые источники витаминов, минералов и ПНЖК

Table 1. Dietary sources of vitamins, minerals and PUFA

Соединение	Ключевые эффекты	Источники	Ссылки
Витамины			
Витамин Е	Улучшает когнитивные функции, защищает нейроны от окислительного стресса, улучшает когнитивные способности, уменьшает отложение бета-амилоида и гиперфосфорилирование тау-белка.	Орехи, семена, растительные масла	[21,39,104],
Витамин D	Регулирует обмен кальция и фосфора. Обладает нейротропным действием: снижает окислительный стресс, улучшает функцию митохондрий и стимулирует выработку нейротрофических факторов (NGF и BDNF). Помогает подавлять воспалительные процессы в нервной ткани.	Рыбий жир, говяжья печень, яичные желтки	[39.55,104]
Витамин К	Участвует в процессе свертывания крови, минерализации костей (активация остеокальцина), способствует улучшению когнитивных функций. Играет ключевую роль в выживании нейронов, пролиферации и хемотаксисе. Обладает нейротропными свойствами (основаны на его антиоксидантном потенциале и противовоспалительном действии).	Зеленые листовые овощи, авокадо, растительные масла, мясо, молочные продукты, яйца	[20,30,32,34,39,104]
Витамин А	Оказывает нейротропное действие, что обусловлено его способностью снижать окислительный стресс и воспаление.	Печень, рыба, яйца, молочные продукты	[20,38,39,104]
Витамин В12, другие витамины группы В	Усиливает выработку нейротрофинов мозга (BDNF и NGF), улучшает когнитивные функции и поддерживает восстановление нервов.	Печень, свинина, рыба, курица, яйца, молочные продукты, фасоль	[39,45,55,104]
Витамин С	Кофактор дофамин-бета-гидроксилазы, участвует в модуляции дофаминергической и глутаматергической нейротрансмиссии, регуляции высвобождения катехоламинов и ацетилхолина из синаптических пузырьков, антиоксидант.	Цитрусовые, шиповник, болгарский перец	[20,39,104]

Соединение	Ключевые эффекты	Источники	Ссылки
Минералы			
Селен	Отвечает за синтез и метаболизм гормонов щитовидной железы, способствует снижению воспалительных реакций, модулирует активность серотонинергической, дофаминергической и норадренергической систем.	Бразильские орехи, тунец	[52,55,105]
Цинк	Играет роль в синтезе ДНК и делении клеток, в иммунологических функциях, синтезе белка и заживлении ран. В гиппокампе и коре головного мозга способствует синаптической передаче, действует как нейротрансмиттер. Обладает антиоксидантными, противовоспалительными и антидепрессивными свойствами.	Устрицы, говядина, тыквенные семечки, яйца, бобовые, семена, орехи, молочные продукты	[52,55,65,105]
Магний	Кофактор различных ферментативных реакций. Важен для оптимальной передачи нервных импульсов и нервно-мышечной координации. Выступает естественным модулятором NMDA-рецепторов, обеспечивая баланс между нормальной синаптической передачей и защитой от перевозбуждения.	Шпинат, орехи, горький шоколад, бобовые, семена (тыквенные, лен и чиа), бананы, цельнозерновые продукты, жирная рыба	[52,55,65,105]
Железо	Является кофактором гидроксилаз ароматических аминокислот (фенилаланин, тирозин, триптофан), которые необходимы в процессах синтеза дофамина, серотонина и норадреналина, участвует в синтезе миелина и метаболизме нейротропных нейронов. Играет ключевую роль в энергетическом обмене клеток, является кофактором ферментов антиоксидантной защиты.	Мясо, субпродукты, морепродукты, орехи, бобы, овощи	[105,106]
Медь	Поддерживает окислительно-восстановительный баланс и способствует антиоксидантной защите головного мозга, выступает важнейшим кофактором для ферментов, синтезирующих нейротрансмиттеры, и модулирует синаптическую передачу нервных импульсов.	Моллюски, семена и орехи, мясные субпродукты, пшеничные отруби, цельнозерновые продукты, шоколад	[105,107]
Йод	Обеспечивает синтез гормонов щитовидной железы, которые регулируют процессы миелинизации, синаптической пластичности, энергетического обмена и антиоксидантной защиты нейронов.	Морские водоросли, рыба и морепродукты, яйца	[108,109]
Марганец	Способствует антиоксидантной защите мозга, необходим для метаболизма нейротрансмиттеров и энергетического обмена, активирует ключевые ферменты цикла Кребса.	Цельнозерновые продукты, моллюски, устрицы, мидии, орехи, соя и другие бобовые, рис, листовые овощи, кофе, чай, многие специи	[105,110]
ПНЖК			
Докозагексаеновая кислота	Поддерживает выработку нейротрофинов (BDNF), необходимых для обучения и памяти, снижает риск нейродегенеративных заболеваний, подавляет провоспалительные цитокины, предшественник нейропротектина D1, основной компонент фоторецепторов сетчатки.	Лосось, сардины, водоросли	[55,101,102,111,112]
Линолевая кислота	Участвует в синтезе провоспалительных эйкозаноидов (простагландины, лейкотриены). Является важным компонентом клеточных мембран.	Свинина, растительные масла (особенно подсолнечное), грецкие орехи, семена льна	[55,101,102,111,112]
Альфа-линоленовая кислота	Обладает антиоксидантным и противовоспалительным действием. Снижает уровень нейровоспаления, уменьшает продукцию провоспалительных цитокинов (TNF- α , IL-1 β , IL-6), подавляет активацию сигнальных путей NF- κ B, JNK и JAK2/STAT3, а также уменьшает окислительный стресс и апоптоз нейронов.	Растительные масла (льняное, рапсовое, соевое), листовые зеленые овощи, семена чиа, семена конопли, грецкие орехи	[101,102,111,112]
Эйкозапентаеновая кислота	Предшественница резолвинов и протектинов — веществ, подавляющих хроническое воспаление. Способствует поддержке когнитивных функций. Снижает риск депрессии и тревожных расстройств. Снижает уровень триглицеридов в крови. Уменьшает агрегацию тромбоцитов. Регулирует активность иммунных клеток.	Рыбий жир, криль	[55,101,102,111,112]
Арахидоновая кислота	Поддерживает функциональность мембран нейронов. Основной предшественник провоспалительных веществ и противовоспалительных метаболитов. Участвует в передаче сигналов в ЦНС через взаимодействие с NMDA-рецепторами, влияет на высвобождение нейромедиаторов, критична для роста нейронов.	Продукция животного происхождения (свинина, говядина, баранина), рыба, морепродукты, яйца	[101,102,112]

7. Выводы

Проведенный анализ данных подтверждает, что микронутриенты и биоактивные соединения играют фундаментальную роль в поддержании гомеостаза центральной нервной системы, выступая ключевыми регуляторами нейропротективных и нейровосстановительных процессов. Витамины (Е, D, К, А, группы В, С), минералы (селен, цинк, магний, железо, медь, йод, марганец) и полиненасыщенные жирные кислоты демонстрируют многокомпонентное действие: от модуляции антиоксидантной защиты и подавления эксайтотоксичности до усиления нейротрофической поддержки (BDNF, NGF) и коррекции нейровоспаления.

Клинически значимым аспектом является синергия нутриентов: комбинации витамина В12 с омега-3 или цинка с магнием потенцируют их нейропротективные свойства, что открывает перспективы для разработки комплексных диетотерапевтических стратегий. Однако переход от доклинических моделей к клинической практике сталкивается с проблемами, включая вариабельность биодоступно-

сти, недостаточную изученность долгосрочных эффектов и необходимость персонализации доз. Например, оптимальное соотношение омега-6/омега-3 (1:1–2:1) и дозировки витамина Е (15 мг/сутки) требуют учета индивидуальных метаболических особенностей и диетических привычек.

Перспективными направлениями исследований остаются: уточнение роли микробиома в метаболизме нейроактивных соединений; разработка нанотехнологических подходов для преодоления гематоэнцефалического барьера и повышения биодоступности; проведение рандомизированных контролируемых испытаний с акцентом на комбинированные схемы (нутриенты + фармакотерапия).

Внедрение данных принципов в клиническую практику может стать основой для диетологической профилактики нейродегенеративных (болезни Альцгеймера, Паркинсона) и нейropsychических (депрессия, тревожные расстройства) заболеваний, что подчеркивает важность междисциплинарного взаимодействия нутрициологии, неврологии и молекулярной биологии.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / REFERENCES

- Dhahri, M., Alghrably, M., Mohammed, H. A., Badshah, S. L., Noreen, N., Moufouk, F. et al. (2021). Natural polysaccharides as preventive and therapeutic horizon for neurodegenerative diseases. *Pharmaceutics*, 14(1), Article 1. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics14010001>
- Moreira, J., Machado, M., Dias-Teixeira, M., Ferraz, R., Delerue-Matos, C., Grosso, C. (2023). The neuroprotective effect of traditional Chinese medicinal plants — A critical review. *Acta Pharmaceutica Sinica B*, 13(8), 3208–3237. <https://doi.org/10.1016/j.apsb.2023.06.009>
- Moukham, H., Lambiasi, A., Barone, G. D., Tripodi, F., Coccetti, P. (2024). Exploiting natural niches with neuroprotective properties: A comprehensive review. *Nutrients*, 16(9), Article 1298. <https://doi.org/10.3390/nu16091298>
- Businaro, R., Vauzour, D., Sarris, J., Münch, G., Gyengesi, E., Brogelli, L., Zuzarte, P. (2021). Therapeutic opportunities for food supplements in neurodegenerative disease and depression. *Frontiers in Nutrition*, 8, Article 669846. <https://doi.org/10.3389/fnut.2021.669846>
- Passeri, E., Elkhoury, K., Morsink, M., Broersen, K., Linder, M., Tamayol, A. et al. (2022). Alzheimer's disease: Treatment strategies and their limitations. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(22), Article 13954. <https://doi.org/10.3390/ijms232213954>
- Muscaritoli, M. (2021). The impact of nutrients on mental health and well-being: Insights from the literature. *Frontiers in Nutrition*, 8, Article 656290. <https://doi.org/10.3389/fnut.2021.656290>
- Marx, W., Moseley, G., Berk, M., Jacka, F. (December 6–7, 2016). *Nutritional psychiatry: The present state of the evidence*. Conference on 'Diet, nutrition and mental health and wellbeing' Plenary Lecture: Mental health as an emerging public health problem. London, 2017. <https://doi.org/10.1017/S0029665117002026>
- Grajek, M., Krupa-Kotara, K., Białek-Dratwa, A., Sobczyk, K., Grot, M., Kowalski, O. et al. (2022). Nutrition and mental health: A review of current knowledge about the impact of diet on mental health. *Frontiers in Nutrition*, 9, Article 943998. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.943998>
- Lahoda Brodská, H., Klempir, J., Zavora, J., Kohout, P. (2023). The role of micro-nutrients in neurological disorders. *Nutrients*, 15(19), Article 4129. <https://doi.org/10.3390/nu15194129>
- Nogueira-de-Almeida, C. A., Gutiérrez, C. A. C., Ramos, L. R., Katz, M., Gonzalez, M. M., Badillo, B. A. et al. (2025). Role of micronutrient supplementation in promoting cognitive healthy aging in Latin America: Evidence-based consensus statement. *Nutrients*, 17(15), Article 2545. <https://doi.org/10.3390/nu17152545>
- Teleanu, D. M., Niculescu, A.-G., Lungu, I. I., Radu, C. I., Vladăcenco, O., Roza, E. et al. (2022). An overview of oxidative stress, neuroinflammation, and neurodegenerative diseases. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(11), Article 5938. <https://doi.org/10.3390/ijms23115938>
- Picca, A., Calvani, R., Coelho-Junior, H. J., Landi, F., Bernabei, R., Marzetti, E. (2020). Mitochondrial dysfunction, oxidative stress, and neuroinflammation: Intertwined roads to neurodegeneration. *Antioxidants*, 9(8), Article 647. <https://doi.org/10.3390/antiox9080647>
- Chang, J., Liu, M., Liu, C., Zhou, S., Jiao, Y., Sun, H. et al. (2024). Effects of vitamins and polyunsaturated fatty acids on cognitive function in older adults with mild cognitive impairment: A meta-analysis of randomized controlled trials. *European Journal of Nutrition*, 63(4), 1003–1022. <https://doi.org/10.1007/s00394-024-03524-y>
- Joffre, C., Dinel, A.-L., Chataigner, M., Pallet, V., Layé, S. (2020). n-3 Polyunsaturated fatty acids and their derivatives reduce neuroinflammation during aging. *Nutrients*, 12(3), Article 647. <https://doi.org/10.3390/nu12030647>
- Pellowski, D., Kusch, P., Henning, T., Kochlik, B., Maeres, M., Schmiedeskamp, A. et al. (2024). Postprandial micronutrient variability and bioavailability: An interventional meal study in young vs. old participants. *Nutrients*, 16(5), Article 625. <https://doi.org/10.3390/nu16050625>
- Rathod, R. S., Khaire, A. A., Kale, A. A., Joshi, S. R. (2016). Effect of vitamin B₁₂ and omega-3 fatty acid supplementation on brain neurotrophins and cognition in rats: A multigeneration study. *Biochimie*, 128–129, 201–208. <https://doi.org/10.1016/j.biochi.2016.08.009>
- Kemse, N., Kale, A., Chavan-Gautam, P., Joshi, S. (2018). Increased intake of vitamin B₁₂, folate, and omega-3 fatty acids to improve cognitive performance in offspring born to rats with induced hypertension during pregnancy. *Food and Function*, 9(7), 3872–3883. <https://doi.org/10.1039/C8FO00467F>
- Kumar, R. R., Singh, L., Thakur, A., Singh, S., Kumar, B. (2022). Role of vitamins in neurodegenerative diseases: A review. *CNS and Neurological Disorders — Drug Targets*, 21(9), 766–773. <https://doi.org/10.2174/1871527320666211119122150>
- da Cunha Germano, B. C., de Moraes, L. C. C., Idalina Neta, F., Fernandes, A. C. L., Pinheiro, F. I., do Rego, A. C. M. et al. (2023). Vitamin E and its molecular effects in experimental models of neurodegenerative diseases. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(13), Article 11191. <https://doi.org/10.3390/ijms241311191>
- Rai, S. N., Singh, P., Steinbusch, H. W. M., Vamanu, E., Ashraf, G., Singh, M. P. (2021). The role of vitamins in neurodegenerative disease: An update. *Biomedicines*, 9(10), Article 1284. <https://doi.org/10.3390/biomedicines9101284>
- Traber, M. G. (2021). Vitamin E: Necessary nutrient for neural development and cognitive function. *Proceedings of the Nutrition Society*, 80(3), 319–326. <https://doi.org/10.1017/S0029665121000914>
- Noor, A., Shah, S. I. A. (2023). The emerging role of vitamin D in neurological health and disease. *Global Journal of Medical, Pharmaceutical, and Biomedical Update*, 18, Article 28. https://doi.org/10.25259/GJMPBU_31_2023
- Hafiz, A. A. (2024). The neuroprotective effect of vitamin D in Parkinson's disease: Association or causation. *Nutritional Neuroscience*, 27(8), 870–886. <https://doi.org/10.1080/1028415X.2023.2259680>
- Tang, Y., Le, W. (2016). Differential roles of M1 and M2 microglia in neurodegenerative diseases. *Molecular Neurobiology*, 53(2), 1181–1194. <https://doi.org/10.1007/s12035-014-9070-5>
- Calvello, R., Cianiulli, A., Nicolardi, G., De Nuccio, F., Giannotti, L., Salvatore, R. et al. (2017). Vitamin D treatment attenuates neuroinflammation and dopaminergic neurodegeneration in an animal model of Parkinson's disease, shifting M1 to M2 microglia responses. *Journal of Neuroimmune Pharmacology*, 12(2), 327–339. <https://doi.org/10.1007/s11481-016-9720-7>
- Gombash, S. E., Lee, P. W., Sawdai, E., Lovett-Racke, A. E. (2022). Vitamin D as a risk factor for multiple sclerosis: Immunoregulatory or neuroprotective? *Frontiers in Neurology*, 13, Article 796933. <https://doi.org/10.3389/fneur.2022.796933>
- Wang, W., Li, Y., Meng, X. (2023). Vitamin D and neurodegenerative diseases. *Heliyon*, 9(1), Article e12877. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e12877>
- Diachenko, A. I., Rodin, I. A., Krasnova, T. N., Klychnikov, O. I., Nefedova, L. N. (2024). The role of vitamin K in the development of neurodegenerative diseases. *Biochemistry (Moscow)*, 89(S1), S57–S70. <https://doi.org/10.1134/S0006297924140049>
- Sharma, V., Aran, K. R. (2025). Unraveling the molecular mechanisms of vitamin deficiency in Alzheimer's disease pathophysiology. *Aging and Health Research*, 5(2), Article 100226. <https://doi.org/10.1016/j.ahr.2025.100226>
- Grimaldi, L., Cavallaro, R. A., De Angelis, D., Fusco, A., Sancesario, G. (2025). Vitamin K properties in stroke and Alzheimer's disease: A Janus Bifrons in protection and prevention. *Molecules*, 30(5), Article 1027. <https://doi.org/10.3390/molecules30051027>
- Chatterjee, K., Mazumder, P. M., Banerjee, S. (2023). Vitamin K2 protects against aluminium chloride-mediated neurodegeneration. *Inflammopharmacology*, 31(5), 2675–2684. <https://doi.org/10.1007/s10787-023-0120-1>
- Emekli-Alturfan, E., Alturfan, A. A. (2023). The emerging relationship between vitamin K and neurodegenerative diseases: A review of current evidence. *Molecular Biology Reports*, 50(1), 815–828. <https://doi.org/10.1007/s11033-022-07925-w>
- Yang, X., Wang, Z., Zandkarimi, F., Liu, Y., Duan, S., Li, Z. et al. (2023). Regulation of VKORC1L1 is critical for p53-mediated tumor suppression through vitamin K metabolism. *Cell Metabolism*, 35(8), 1474–1490. <https://doi.org/10.1016/j.cmet.2023.06.014>
- Sadler, R. A., Shoveller, A. K., Shandilya, U. K., Charchoglyan, A., Wagter-Lesperance, L., Bridle, B. W. et al. (2024). Beyond the coagulation cascade: Vitamin K and its multifaceted impact on human and domesticated animal health. *Current Issues in Molecular Biology*, 46(7), 7001–7031. <https://doi.org/10.3390/cimb46070418>
- Isik, F. I., Thomson, S., Cueto, J. F., Spathos, J., Breit, S. N., Tsai, V. W. W. et al. (2024). A systematic review of the neuroprotective role and biomarker potential of GDF15 in neurodegeneration. *Frontiers in Immunology*, 15, Article 1514518. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2024.1514518>
- Guo, Z., Zhang, H., Jinge, X., Yan, J., Wang, X., Liu, Y. et al. (2024). Stanniocalcin 2 promotes neuronal differentiation in neural stem/progenitor cells of the mouse subventricular zone through activation of AKT pathway. *Stem Cells and Development*, 33(19–20), 551–561. <https://doi.org/10.1089/scd.2024.0094>
- D'Ambrosio, D. N., Clugston, R. D., Blaner, W. S. (2011). Vitamin A metabolism: An update. *Nutrients*, 3(1), 63–103. <https://doi.org/10.3390/nu3010063>
- Carazo, A., Macáková, K., Matoušová, K., Krčmová, L. K., Protti, M., Mladěnka, P. (2021). Vitamin A update: Forms, sources, kinetics, detection, function, deficiency, therapeutic use and toxicity. *Nutrients*, 13(5), Article 1703. <https://doi.org/10.3390/nu13051703>
- Orywal, K., Socha, K., Iwaniuk, P., Kaczyński, P., Farhan, J. A., Zoń, W. et al. (2025). Vitamins in the prevention and support therapy of neurodegenerative diseases. *International Journal of Molecular Sciences*, 26(3), Article 1333. <https://doi.org/10.3390/ijms26031333>
- Clark, J. N., Whiting, A., McCaffery, P. (2020). Retinoic acid receptor-targeted drugs in neurodegenerative disease. *Expert Opinion on Drug Metabolism and Toxicology*, 16(11), 1097–1108. <https://doi.org/10.1080/17425255.2020.1811232>
- Chang, M. C., Kwak, S. G., Kwak, S. (2021). Effect of dietary vitamins C and E on the risk of Parkinson's disease: A meta-analysis. *Clinical Nutrition*, 40(6), 3922–3930. <https://doi.org/10.1016/j.clnu.2021.05.011>
- Wu, F., Xu, K., Liu, L., Zhang, K., Xia, L., Zhang, M. et al. (2019). Vitamin B12 enhances nerve repair and improves functional recovery after traumatic brain injury by inhibiting ER stress-induced neuron injury. *Frontiers in Pharmacology*, 10, Article 406. <https://doi.org/10.3389/fphar.2019.00406>
- Battaglia-Hsu, S., Akchiche, N., Noel, N., Alberto, J.-M., Jeannesson, E., Orozco-Barrios, C. E. et al. (2009). Vitamin B12 deficiency reduces proliferation and promotes differentiation of neuroblastoma cells and up-regulates PP2A, proNGF, and TACE. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(51), 21930–21935. <https://doi.org/10.1073/pnas.0811794106>
- Calderón-Ospina, C. A., Nava-Mesa, M. O. (2020). B Vitamins in the nervous system: Current knowledge of the biochemical modes of action and synergies of thiamine, pyridoxine, and cobalamin. *CNS Neuroscience and Therapeutics*, 26(1), 5–13. <https://doi.org/10.1111/cns.13207>
- Kennedy, D. (2016). B Vitamins and the brain: Mechanisms, dose and efficacy — a review. *Nutrients*, 8(2), Article 68. <https://doi.org/10.3390/nu8020068>
- Mikkelsen, K., Stojanovska, L., Tangalakis, K., Bosevski, M., Apostolopoulos, V. (2016). Cognitive decline: A vitamin B perspective. *Maturitas*, 93, 108–113. <https://doi.org/10.1016/j.maturitas.2016.08.001>
- Palacios, N., Scott, T., Sahasrabudhe, N., Gao, X., Tucker, K. L. (2019). Lower plasma vitamin B-6 is associated with 2-year cognitive decline in the Boston Puerto Rican health study. *The Journal of Nutrition*, 149(4), 635–641. <https://doi.org/10.1093/jn/nxy268>
- Kibitkina, A. A., Fedulova, L. V., Karabanov, S. Yu., Vasilevskaya, E. R. (2024). Amino acids with neuroregulatory potential: Mechanisms to optimize brain function. *Vsyo o myase*, 6, 3–15. <https://doi.org/10.21323/2071-2499-2024-6-3-15>
- Plevin, D., Galletly, C. (2020). The neuropsychiatric effects of vitamin C deficiency: A systematic review. *BMC Psychiatry*, 20(1), Article 315. <https://doi.org/10.1186/s12888-020-02730-w>

50. Kangisser, L., Tan, E., Bellomo, R., Deane, A. M., Plummer, M. P. (2021). Neuroprotective properties of vitamin C: A scoping review of pre-clinical and clinical studies. *Journal of Neurotrauma*, 38(16), 2194–2205. <https://doi.org/10.1089/neu.2020.7443>
51. Olajide, O. J., Fatoye, J. O., Idowu, O. F., Ilekeya, D., Gbadamosi, I. T., Gbadamosi, M. T. et al. (2018). Reversal of behavioral decline and neuropathology by a complex vitamin supplement involves modulation of key neurochemical stressors. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 62, 120–131. <https://doi.org/10.1016/j.etap.2018.07.005>
52. Wang, J., Um, P., Dickerman, B. A., Liu, J. (2018). Zinc, magnesium, selenium and depression: A Review of the evidence, potential mechanisms and implications. *Nutrients*, 10(5), Article 584. <https://doi.org/10.3390/nu10050584>
53. Björkholm, C., Monteggia, L. M. (2016). BDNF — a key transducer of antidepressant effects. *Neuropharmacology*, 102, 72–79. <https://doi.org/10.1016/j.neuropharm.2015.10.034>
54. Brüning, C. A., Souza, A. C. G., Gai, B. M., Zeni, G., Nogueira, C. W. (2011). Antidepressant-like effect of m-trifluoromethyl-diphenyl diselenide in the mouse forced swimming test involves opioid and serotonergic systems. *European Journal of Pharmacology*, 658(2–3), 145–149. <https://doi.org/10.1016/j.ejphar.2011.02.039>
55. Ekpo, U. U., Umana, U. E., Sadeeq, A. A. (2023). Impact of nutrition on depression: a review of some dietary components with antidepressant effects and their mechanism of action. *The Journal of Neurobehavioral Sciences*, 10(3), 86–96. https://doi.org/10.4103/jnbs.jnbs_5_23
56. Schneider-Matya, D., Cybulska, A. M., Szkup, M., Pilarczyk, B., Panczyk, M., Lubkowska, A. et al. (2023). Selenium as a factor moderating depression and obesity in middle-aged women. *Nutrients*, 15(7), Article 1594. <https://doi.org/10.3390/nu15071594>
57. National Institutes of Health. (2025). Selenium — Health Professional. Retrieved from <https://ods.od.nih.gov/factsheets/Selenium-HealthProfessional/#en18> Accessed August 10, 2025.
58. Prasad, A. S. (1995). Zinc: An overview. *Nutrition*, 11(1 Suppl), 93–99.
59. Pfander, S., Föhr, K., Lutz, A.-K., Putz, S., Achberger, K., Linta, L. et al. (2016). Cellular zinc homeostasis contributes to neuronal differentiation in human induced pluripotent stem cells. *Neural Plasticity*, 2016, 1–15. <https://doi.org/10.1155/2016/3760702>
60. Satała, G., Duszyńska, B., Stachowicz, K., Rafalo, A., Pochwat, B., Luckhart, C. et al. (2016). Concentration-dependent dual mode of Zn action at serotonin 5-HT1A receptors: In vitro and in vivo studies. *Molecular Neurobiology*, 53(10), 6869–6881. <https://doi.org/10.1007/s12035-015-9586-3>
61. Takeda, A., Tamano, H., Ogawa, T., Takada, S., Ando, M., Oku, N. et al. (2012). Significance of serum glucocorticoid and chelatable zinc in depression and cognition in zinc deficiency. *Behavioural Brain Research*, 226(1), 259–264. <https://doi.org/10.1016/j.bbr.2011.09.026>
62. Jarosz, M., Olbert, M., Wyszogrodzka, G., Młyniec, K., Librowski, T. (2017). Antioxidant and anti-inflammatory effects of zinc. Zinc-dependent NF-κB signaling. *Inflammopharmacology*, 25(1), 11–24. <https://doi.org/10.1007/s10787-017-0309-4>
63. Doboszewska, U., Wlaź, P., Nowak, G., Radziwoń-Zaleska, M., Cui, R., Młyniec, K. (2017). Zinc in the monoaminergic theory of depression: Its relationship to neural plasticity. *Neural Plasticity*, 2017, 1–18. <https://doi.org/10.1155/2017/3682752>
64. Młyniec, K. (2015). Zinc in the glutamatergic theory of depression. *Current Neuropharmacology*, 13(4), 505–513. <https://doi.org/10.2174/1570159X13666150115220617>
65. Gröber, U., Schmidt, J., Kisters, K. (2015). Magnesium in prevention and therapy. *Nutrients*, 7(9), 8199–8226. <https://doi.org/10.3390/nu7095388>
66. Kirkland, A. E., Sarlo, G. L., Holton, K. F. (2018). The role of magnesium in neurological disorders. *Nutrients*, 10(6), Article 730. <https://doi.org/10.3390/nu10060730>
67. Stroebel, D., Casado, M., Paoletti, P. (2018). Triheteromeric NMDA receptors: From structure to synaptic physiology. *Current Opinion in Physiology*, 2, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.cophys.2017.12.004>
68. Ji, N., Lei, M., Chen, Y., Tian, S., Li, C., Zhang, B. (2023). How oxidative stress induces depression? *ASN Neuro*, 15(1), Article 17590914231181037. <https://doi.org/10.1177/17590914231181037>
69. Olloquequi, J., Cornejo-Córdova, E., Verdager, E., Soriano, F. X., Binnvignat, O., Auladell, C. et al. (2018). Excitotoxicity in the pathogenesis of neurological and psychiatric disorders: Therapeutic implications. *Journal of Psychopharmacology*, 32(3), 265–275. <https://doi.org/10.1177/0269881118754680>
70. Clerc, P., Young, C. A., Bordt, E. A., Grigore, A. M., Fiskum, G., Polster, B. M. (2013). Magnesium sulfate protects against the bioenergetic consequences of chronic glutamate receptor stimulation. *PLoS ONE*, 8(11), Article e79982. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0079982>
71. Lambuk, L., Jafri, A. J. A., Arfuzir, N. N. N., Iezhitsa, I., Agarwal, R., Rozali, K. N. B. et al. (2017). Neuroprotective effect of magnesium acetyltaurate against NMDA-induced excitotoxicity in rat retina. *Neurotoxicity Research*, 31(1), 31–45. <https://doi.org/10.1007/s12640-016-9658-9>
72. Berthou, C., Iliou, J. P., Barba, D. (2022). Iron, neuro-bioavailability and depression. *EJHaem*, 3(1), 263–275. <https://doi.org/10.1002/jha2.321>
73. Dichtl, S., Haschka, D., Nairz, M., Seifert, M., Volani, C., Lutz, O. et al. (2018). Dopamine promotes cellular iron accumulation and oxidative stress responses in macrophages. *Biochemical Pharmacology*, 148, 193–201. <https://doi.org/10.1016/j.bcp.2017.12.001>
74. Kulaszewska, M., Kwiatkowski, S., Skonieczna-Żydecka, K. (2024). The iron metabolism with a specific focus on the functioning of the nervous system. *Biomedicines*, 12(3), Article 595. <https://doi.org/10.3390/biomedicines12030595>
75. Gutteridge, J. M. C. (1998). Iron in Free Radical Reactions and Antioxidant Protection. Chapter in a book: *Free Radicals, Oxidative Stress, and Antioxidants*. Springer, Boston, MA, 1998. https://doi.org/10.1007/978-1-4757-2907-8_1
76. Kuang, F., Liu, J., Tang, D., Kang, R. (2020). Oxidative damage and antioxidant defense in ferroptosis. *Frontiers in Cell and Developmental Biology*, 8, Article 586578. <https://doi.org/10.3389/fcell.2020.586578>
77. Gasperini, L., Meneghetti, E., Pastore, B., Benetti, F., Legname, G. (2015). Prion protein and copper cooperatively protect neurons by modulating NMDA receptor through S-nitrosylation. *Antioxidants and Redox Signaling*, 22(9), 772–784. <https://doi.org/10.1089/ars.2014.6032>
78. Lane, A. R., Roberts, B. R., Fahrni, C. J., Faundez, V. (2025). A primer on copper biology in the brain. *Neurobiology of Disease*, 212, Article 106974. <https://doi.org/10.1016/j.nbd.2025.106974>
79. An, Y., Li, S., Huang, X., Chen, X., Shan, H., Zhang, M. (2022). The role of copper homeostasis in brain disease. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(22), Article 13850. <https://doi.org/10.3390/ijms232213850>
80. Gale, J., Aizenman, E. (2024). The physiological and pathophysiological roles of copper in the nervous system. *European Journal of Neuroscience*, 60(1), 3505–3543. <https://doi.org/10.1111/ejn.16370>
81. D'Ambrosi, N., Rossi, L. (2015). Copper at synapse: Release, binding and modulation of neurotransmission. *Neurochemistry International*, 90, 36–45. <https://doi.org/10.1016/j.neuint.2015.07.006>
82. Rodriguez-Diaz, E., Pearce, E. N. (2020). Iodine status and supplementation before, during, and after pregnancy. *Best Practice and Research Clinical Endocrinology and Metabolism*, 34(4), Article 101430. <https://doi.org/10.1016/j.beem.2020.101430>
83. Abel, M. H., Caspersen, I. H., Sengpiel, V., Jacobsson, B., Meltzer, H. M., Magnus, P. et al. (2020). Insufficient maternal iodine intake is associated with subfertility, reduced foetal growth, and adverse pregnancy outcomes in the Norwegian Mother, Father and Child Cohort Study. *BMC Medicine*, 18(1), Article 211. <https://doi.org/10.1186/s12916-020-01676-w>
84. Sterling, K., Brenner, M. A., Sakurada, T. (1980). Rapid effect of triiodothyronine on the mitochondrial pathway in rat liver in Vivo. *Science*, 210(4467), 340–342. <https://doi.org/10.1126/science.7423197>
85. Venediktova, N. I., Mashchenko, O. V., Talanov, E. Y., Belosludtseva, N. V., Mironova, G. D. (2020). Energy metabolism and oxidative status of rat liver mitochondria in conditions of experimentally induced hyperthyroidism. *Mitochondrion*, 52, 190–196. <https://doi.org/10.1016/j.mito.2020.04.005>
86. Vallortigara, J., Alfons, S., Micheau, J., Higuere, P., Enderlin, V. (2008). T3 administration in adult hypothyroid mice modulates expression of proteins involved in striatal synaptic plasticity and improves motor behavior. *Neurobiology of Disease*, 31(3), 378–385. <https://doi.org/10.1016/j.nbd.2008.05.015>
87. Féart, C., Mingaud, F., Enderlin, V., Husson, M., Alfons, S., Higuere, P. et al. (2005). Differential effect of retinoic acid and triiodothyronine on the age-related hypo-expression of neurogranin in rat. *Neurobiology of Aging*, 26(5), 729–738. <https://doi.org/10.1016/j.neurobiolaging.2004.06.004>
88. Alamino, V. A., Montesinos, M. M., Rabinovich, G. A., Pellizas, C. G. (2016). The thyroid hormone triiodothyronine reinvigorates dendritic cells and potentiates anti-tumor immunity. *OncoImmunology*, 5(1), Article e1064579. <https://doi.org/10.1080/2162402X.2015.1064579>
89. Callio, J., Oury, T. D., Chu, C. T. (2005). Manganese superoxide dismutase protects against 6-hydroxydopamine injury in mouse brains. *Journal of Biological Chemistry*, 280(18), 18536–18542. <https://doi.org/10.1074/jbc.M413224200>
90. Huang, H., Guo, F., Cao, Y., Shi, W., Xia, Q. (2012). Neuroprotection by manganese superoxide dismutase (Mn SOD) mimics: Antioxidant effect and oxidative stress regulation in acute experimental stroke. *CNS Neuroscience and Therapeutics*, 18(10), 811–818. <https://doi.org/10.1111/j.1755-5949.2012.00380.x>
91. Horning, K. J., Caito, S. W., Tipps, K. G., Bowman, A. B., Aschner, M. (2015). Manganese is essential for neuronal health. *Annual Review of Nutrition*, 35(1), 71–108. <https://doi.org/10.1146/annurev-nutr-071714-034419>
92. Balachandran, R. C., Mukhopadhyay, S., McBride, D., Veevers, J., Harrison, F. E., Aschner, M. et al. (2020). Brain manganese and the balance between essential roles and neurotoxicity. *Journal of Biological Chemistry*, 295(19), 6312–6329. <https://doi.org/10.1074/jbc.REV119.009453>
93. Bonke, E., Siebels, I., Zwicker, K., Dröse, S. (2016). Manganese ions enhance mitochondrial H₂O₂ emission from Krebs cycle oxidoreductases by inducing permeability transition. *Free Radical Biology and Medicine*, 99, 43–53. <https://doi.org/10.1016/j.freeradbiomed.2016.07.026>
94. Cao, D., Kevala, K., Kim, J., Moon, H., Jun, S. B., Lovinger, D. et al. (2009). Docosahexaenoic acid promotes hippocampal neuronal development and synaptic function. *Journal of Neurochemistry*, 111(2), 510–521. <https://doi.org/10.1111/j.1471-4519.2009.06335.x>
95. Ranard, K. M., Appel, B. (2025). Creation of a novel zebrafish model with low DHA status to study the role of maternal nutrition during neurodevelopment. *Journal of Lipid Research*, 66(1), Article 100716. <https://doi.org/10.1016/j.jlr.2024.100716>
96. Bazinet, R. P., Layé, S. (2014). Polyunsaturated fatty acids and their metabolites in brain function and disease. *Nature Reviews Neuroscience*, 15(12), 771–785. <https://doi.org/10.1038/nrn3820>
97. Sublette, M. E., Daray, F. M., Ganança, L., Shaikh, S. R. (2024). The role of polyunsaturated fatty acids in the neurobiology of major depressive disorder and suicide risk. *Molecular Psychiatry*, 29(2), 269–286. <https://doi.org/10.1038/s41380-023-02322-6>
98. Suh, S. W., Lim, E., Burm, S.-Y., Lee, H., Bae, J. B., Han, J. W. et al. (2024). The influence of n-3 polyunsaturated fatty acids on cognitive function in individuals without dementia: A systematic review and dose-response meta-analysis. *BMC Medicine*, 22(1), Article 109. <https://doi.org/10.1186/s12916-024-03296-0>
99. Karabanov, S. Yu., Kibitkina, A. A., Vasilevskaya, E. R., Fedulova, L. V. (2024). Molecular signaling of key neurotrophic factors in the brain while the occurrence of affective disorders. *Genes and Cells*, 19(3), 334–347. <https://doi.org/10.17816/gc631853>
100. Stachowicz, K. (2023). The role of polyunsaturated fatty acids in neuronal signaling in depression and cognitive processes. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, 737, Article 109555. <https://doi.org/10.1016/j.abb.2023.109555>
101. Smolińska, K., Szopa, A., Sobczyński, J., Serefko, A., Dobrowolski, P. (2024). Nutritional quality implications: Exploring the impact of a fatty acid-rich diet on central nervous system development. *Nutrients*, 16(7), Article 1093. <https://doi.org/10.3390/nu16071093>

102. Rizzo, G., Baroni, L., Lombardo, M. (2023). Promising sources of plant-derived polyunsaturated fatty acids: A narrative review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 20(3), Article 1683. <https://doi.org/10.3390/ijerph20031683>
103. Simopoulos, A. P. (2011). Evolutionary aspects of diet: The omega-6/omega-3 ratio and the brain. *Molecular Neurobiology*, 44(2), 203–215. <https://doi.org/10.1007/s12035-010-8162-0>
104. Chungchunlam, S. M. S., Moughan, P. J. (2024). Comparative bioavailability of vitamins in human foods sourced from animals and plants. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 64(31), 11590–11625. <https://doi.org/10.1080/10408398.2023.2241541>
105. Koch, W., Czop, M., Nawrocka, A., Wiącek, D. (2020). Contribution of major groups of food products to the daily intake of selected elements — Results from analytical determinations supported by chemometric analysis. *Nutrients*, 12(11), Article 3412. <https://doi.org/10.3390/nu12113412>
106. Eberl, E., Li, A. S., Zheng, Z. Y. J., Cunningham, J., Rangan, A. (2021). A temporal change in iron content of vegetables and legumes in Australia: A scoping review. *Foods*, 11(1), Article 56. <https://doi.org/10.3390/foods11010056>
107. De Romaña, D. L., Olivares, M., Uauy, R., Araya, M. (2011). Risks and benefits of copper in light of new insights of copper homeostasis. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 25(1), 3–13. <https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2010.11.004>
108. Nedić, O. (2023). Iodine: Physiological importance and food sources. *eFood*, 4(1), Article e63. <https://doi.org/10.1002/efd2.63>
109. Krela-Kaźmierczak, I., Czarnywojtek, A., Skoracka, K., Rychter, A. M., Ratajczak, A. E., Szymczak-Tomczak, A. et al. (2021). Is there an ideal diet to protect against iodine deficiency? *Nutrients*, 13(2), Article 513. <https://doi.org/10.3390/nu13020513>
110. Goluch, Z., Haraf, G. (2023). Goose meat as a source of dietary manganese — A systematic review. *Animals*, 13(5), Article 840. <https://doi.org/10.3390/ani13050840>
111. Shahidi, F., Ambigaipalan, P. (2018). Omega-3 polyunsaturated fatty acids and their health benefits. *Annual Review of Food Science and Technology*, 9(1), 345–381. <https://doi.org/10.1146/annurev-food-111317-095850>
112. Mititelu, M., Lupuliasa, D., Neacșu, S. M., Olteanu, G., Busnatu, Ș. S., Mihai, A. et al. (2024). Polyunsaturated fatty acids and human health: A key to modern nutritional balance in association with polyphenolic compounds from food sources. *Foods*, 14(1), Article 46. <https://doi.org/10.3390/foods14010046>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ	AUTHOR INFORMATION
Принадлежность к организации	Affiliation
<p>Федулова Лилия Вячеславовна — доктор технических наук, профессор РАН, заведующий Клиникой-лабораторией биологически активных веществ животного происхождения, Федеральный научный центр пищевых систем им. В. М. Горбатова 109316, Москва, ул. Талалихина, 26 E-mail: l.fedulova@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3573-930X</p> <p>Кибиткина Анастасия Анатольевна — младший научный сотрудник, Клиника-лаборатория биологически активных веществ животного происхождения, Федеральный научный центр пищевых систем им. В. М. Горбатова РАН 109316, Москва, ул. Талалихина, 26 E-mail: a.kibitkina@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6934-7342</p> <p>Василевская Екатерина Романовна — кандидат технических наук, научный сотрудник, Клиника-лаборатория биологически активных веществ животного происхождения, Федеральный научный центр пищевых систем им. В. М. Горбатова 109316, Москва, ул. Талалихина, 26 E-mail: e.vasilevskaya@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4752-3939</p> <p>Карабанов Сергей Юрьевич — кандидат ветеринарных наук, научный сотрудник, Клиника-лаборатория биологически активных веществ животного происхождения, Федеральный научный центр пищевых систем им. В. М. Горбатова 109316, Москва, ул. Талалихина, 26 E-mail: s.karabanov@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1688-4045 * автор для контактов</p> <p>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 109316, Москва, ул. Талалихина, 26 E-mail: d.utyantov@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7693-3032</p>	<p>Liliya V. Fedulova, Doctor of Technical Sciences, Professor of RAS, Head of the Experimental Clinic and Research Laboratory for Bioactive Substances of Animal Origin, V. M. Gorbato Federal Research Center for Food Systems 26, Talalikhin str., 109316, Moscow, Russia E-mail: l.fedulova@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3573-930X</p> <p>Anastasiya A. Kibitkina, Research Assistant, Experimental Clinic and Research Laboratory for Bioactive Substances of Animal Origin, V. M. Gorbato Federal Research Center for Food Systems 26, Talalikhin str., 109316, Moscow, Russia E-mail: a.kibitkina@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6934-7342</p> <p>Ekaterina R. Vasilevskaya, Candidate of Technical Sciences, Researcher, Experimental Clinic and Research Laboratory for Bioactive Substances of Animal Origin, V. M. Gorbato Federal Research Center for Food Systems 26, Talalikhin str., 109316, Moscow, Russia E-mail: e.vasilevskaya@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4752-3939</p> <p>Sergey Yu. Karabanov, Candidate of Veterinary Sciences, Researcher, Experimental Clinic and Research Laboratory for Bioactive Substances of Animal Origin, V. M. Gorbato Federal Research Center for Food Systems 26, Talalikhin str., 109316, Moscow, Russia E-mail: s.karabanov@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1688-4045 * corresponding author</p> <p>Dmitry A. Utyanov, Candidate of Technical Sciences, Researcher, Laboratory of Scientific and Methodical Work, Biological and Analytical Research, V. M. Gorbato Federal Research Center for Food Systems 26, Talalikhin str., 109316, Moscow, Russia E-mail: d.utyantov@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7693-3032</p>
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/10.21323/2618-9771-2025-8-4-488-497>

Поступила 12.05.2025

Поступила после рецензирования 22.10.2025

Принята в печать 27.10.2025

© Сорокина Н. П., Смыков И. Т., Кучеренко И. В., Кураева Е. В., Дуганова А. Ю., 2025

<https://www.fsjour.com/jour>

Научная статья

Открытый доступ

ВЛИЯНИЕ ЛИОФИЛИЗАЦИИ И КРИОПРОТЕКЦИИ НА ВЫЖИВАЕМОСТЬ КУЛЬТУР *LACTIPLANTIBACILLUS PLANTARUM*

Сорокина Н. П., Смыков И. Т., Кучеренко И. В.*, Кураева Е. В., Дуганова А. Ю.

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

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: АННОТАЦИЯ

лактобациллы,
лиофилизация,
криопротекторы,
выживаемость,
метаболическая
активность

Лиофилизация на протяжении многих лет признается эффективным методом сохранения коллекционных культур, бактериальных заквасок и пробиотиков. Для защиты бактериальных клеток от стрессовых воздействий в процессе замораживания и сушки, для повышения их выживаемости используются различные криопротекторы. Целью исследования была оценка влияния трех режимов замораживания перед лиофильной сушкой при температуре минус 20, 30 и 55 °C и растворов двух криопротекторов — сахарозы и трегалозы на выживаемость и сохранение метаболической активности мезофильных лактобацилл. Культуры выращивали в 10 % обезжиренном молоке, в опытных вариантах к исследуемой культуре добавляли 20 % раствор криопротектора в соотношении 4:1. Для определения влияния условий лиофильной сушки на выживаемость и метаболическую активность бактерий, были разработаны и проведены полные двухфакторные трёхуровневые эксперименты. В качестве представительных микроорганизмов лактобацилл исследовали два штамма вида *Lactiplantibacillus plantarum* из коллекции ВНИИМС, которые используются в составе бактериальных заквасок для сыров. Результаты оценки жизнеспособности бактерий после лиофилизации показали, что оба криопротектора повышают выживаемость культур при всех режимах замораживания, но лучшие показатели выживаемости получены с использованием трегалозы. Установлена штамм-зависимость эффективности лиофилизации исследованных образцов: у штамма *Lactiplantibacillus plantarum* 28 максимальная выживаемость была выявлена при использовании температуры замораживания минус 30 °C, у штамма *Lactiplantibacillus plantarum* 37 — при температуре минус 55 °C с добавлением криопротектора трегалозы к обоим штаммам. Для сохранения метаболической активности обеих культур наилучшим было предварительное замораживание при температуре минус 20 °C и также с трегалозой. Показано, что наибольшая эффективность действия сахарозы и трегалозы в качестве лиопротекторов при лиофильной сушке, для обоих штаммов бактерий находится в одном и том же диапазоне температур предварительного замораживания близкой к минус 30 °C. Выявленная штамм-зависимость эффективности лиофилизации должна учитываться при выборе режимов сушки различных коллекционных культур, предназначенных для длительного хранения, и предполагает индивидуальный подход к каждой культуре. Полученные результаты также могут быть использованы при лиофильной сушке бактериальной массы при производстве моновидовых бактериальных заквасок.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Статья подготовлена в рамках выполнения исследований по государственному заданию № FRFF-2023-0001 Федерального научного центра пищевых систем им. В. М. Горбатова Российской академии наук.

Received 12.05.2025

Accepted in revised 22.10.2025

Accepted for publication 27.10.2025

© Sorokina N. P., Smykov I. T., Kucherenko I. V., Kuraeva E. V., Duganova A. Yu., 2025

Available online at <https://www.fsjour.com/jour>

Original scientific article

Open access

THE EFFECT OF LYOPHILIZATION AND CRYOPROTECTION ON SURVIVAL OF *LACTIPLANTIBACILLUS PLANTARUM* STRAINS

Ninel P. Sorokina, Igor T. Smykov, Irina V. Kucherenko*, Elena V. Kuraeva, Anna Yu. Duganova

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

KEYWORDS:

vitamins, minerals,
polyunsaturated
fatty acids,
neuroinflammation,
cognitive function

ABSTRACT

Lyophilization has been recognized for many years as an effective method for storing collection cultures, bacterial starter cultures, and probiotics. Cryoprotectors are used to protect bacterial cells from stress during freezing and drying, and to increase their survival. The purpose of our study was to evaluate an effect of three freezing regimes before freeze-drying at temperatures of –20, –30, and –55 °C and solutions of two cryoprotectors, sucrose and trehalose, on the survival and preservation of the metabolic activity of mesophilic lactobacilli. The cultures were grown in 10 % skimmed milk, and in experimental versions, a 20 % cryoprotector solution was added to the culture in a 4:1 ratio. To determine an effect of freeze-drying conditions on bacterial survival and metabolic activity, complete two-factor, three-level experiments were developed and conducted. Two strains of the species *Lactiplantibacillus plantarum* from the VNIIMS collection, which are used in bacterial starter cultures for cheeses, were studied as representative microorganisms of lactobacilli. The results of assessing the viability of bacteria after lyophilization showed that both cryoprotectors increased the survival of cultures under all freezing conditions, but the best survival rates were obtained using trehalose. Strain-dependent effectiveness of lyophilization of the studied strains was established: in strain *Lactiplantibacillus plantarum* 28, the maximum survival was at a freezing temperature of –30 °C, in strain *Lactiplantibacillus plantarum* 37 — at a temperature of –55 °C with the addition of cryoprotector trehalose to both strains. Pre-freezing at –20 °C, also with trehalose, was the best method for preserving the metabolic activity of both cultures. It was shown that the greatest effectiveness of sucrose and trehalose as lyoprotectants during freeze-drying for both bacterial strains was found within the same pre-freezing temperature range of –30 °C. The identified strain-dependent effectiveness of lyophilization should be considered when selecting drying regimens for various collection cultures intended for long-term storage and requires an individual approach for each

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Сорокина, Н. П., Смыков, И. Т., Кучеренко, И. В., Кураева, Е. В., Дуганова, А. Ю. (2025). Влияние лиофилизации и криопротекции на выживаемость культур *Lactiplantibacillus plantarum*. *Пищевые системы*, 8(4), 488–497. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-4-488-497>

FOR CITATION: Sorokina, N. P., Smykov, I. T., Kucherenko, I. V., Kuraeva, E. V., Duganova, A. Yu. (2025). The effect of lyophilization and cryoprotection on survival of *Lactiplantibacillus plantarum* strains. *Food Systems*, 8(4), 488–497. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-4-488-497>

culture. The obtained results can also be used in freeze-drying of bacterial mass for the production of single-species bacterial starter cultures.

FUNDING: The article was prepared as part of research on state task No. FRFF-2023-0001 of the V. M. Gorbatoev Federal Scientific Center for Food Systems of the Russian Academy of Sciences.

1. Введение

Сохранение коллекционного фонда микроорганизмов в течение длительного времени без потери их биологических и технологически важных свойств является важнейшей задачей как для производителей бактериальных заквасок, так и держателей биоресурсных коллекций. Современные методы консервации, способные тормозить процессы метаболизма, не нарушая целостность клеток, могут обеспечить длительное хранение штаммов без изменения их жизнеспособности, биохимической активности и производственно-ценных свойств.

Для хранения коллекционных культур, а также при изготовлении коммерческих заквасок и пробиотиков на протяжении многих десятилетий широко используется лиофилизация, которая является «щадящим» методом удаления влаги из бактериальных клеток, сохраняющая их жизнеспособность. Однако подходы к работе с коллекционными культурами отличаются от промышленных технологий консервации микробной массы, при которых, как правило, осуществляется pH-стабирование для увеличения концентрации клеток, отделение бактериальных клеток от культуральной среды, суспендирование их в защитных средах, розлив в кюветы, замораживание и сушка. Консервация коллекционных штаммов основана на принципах, нацеленных на обеспечение максимального сохранения исходных свойств культур для их дальнейшего целевого использования [1]. Кроме этого, критически важно исключить контаминацию коллекционных культур посторонними микроорганизмами. В связи с этим все манипуляции с сохраняемыми штаммами минимизированы и сводятся к помещению образцов в стерильные емкости для лиофилизации с последующим герметичным укупориванием или запайкой после сушки для дальнейшего хранения.

Поскольку в процессе лиофильной сушки микроорганизмы сначала замораживают, а потом подвергают высушиванию под вакуумом, имеет место сочетание двух стрессов — и замораживания и высушивания, которые оказывают более негативное воздействие на клетки по сравнению с криоконсервацией (хранением в замороженном состоянии без высушивания). Факторы, влияющие на выживаемость микроорганизмов при замораживании и оттаивании, активно изучаются уже много десятилетий, но весь комплекс факторов и условий, которые вызывают необратимые изменения в клетках еще остаются до конца не раскрытыми [2,3]. Считается, что самый серьезный ущерб наносится цитоплазматическим мембранам и белкам. Кристаллообразование при замораживании делает клеточную мембрану более жесткой из-за снижения ее проницаемости, из-за чего увеличивается концентрация веществ внутри клетки. В результате возникает физиологический стресс, часть популяции гибнет [4].

Значительное влияние на выживаемость и сохранение свойств культур оказывают режимы замораживания и сушки: предварительная холодовая адаптация, скорость замораживания, окончательная температура замороженной бактериальной массы, температура десорбции, остаточная влажность и др. Эти параметры требуют индивидуального подбора для разных таксономических групп и даже отдельных штаммов [5–8].

Повышение выживаемости микроорганизмов при сублимационной сушке достигается за счёт изменения условий культивирования, увеличения исходной концентрации бактериальных клеток, оптимизации режимов сублимационной сушки, добавления различных криопротекторов [9]. Rakchai с соавторами [10] продемонстрировали более высокую выживаемость лактобацилл при концентрации клеток 10^9 – 10^{10} КОЕ/г, чем при содержании клеток 10^8 КОЕ/г. Wang с соавторами [3] установили увеличение выживаемости при использовании в качестве криопротектора 10% обезжиренного молока и его смеси с наночастицами фитогликогена и эмульсии Пикеринга. В другой работе была показана эффективность нескольких криопротекторов: сахарозы, трегалозы, обезжиренного молока и обезжиренного молока с глутаматом натрия [11,12], как при лиофилизации, так и при хранении. Особое значение имеют режимы предварительного замораживания. Самую высокую жизнеспособность после сублимационной сушки при изучении влияния трех режимов замораживания (минус 20 °C, минус 80 °C и минус 196 °C) для молочнокислых бактерий *Lactobacillus paracasei*, *Pediococcus parvulus* и *Lactobacillus mali* выявили при температуре минус 196 °C [13]. Yang с соавторами [14] показали, что выживаемость культуры *Lactiplantibacillus*

plantarum lip-1 была выше при температуре замораживания минус 80 °C, чем при минус 20 °C. В отношении культур *Lactiplantibacillus plantarum* (далее *L. plantarum*) установлено влияние температуры замораживания на целостность и проницаемость клеточных мембран, активность лактатдегидрогеназы и, в целом, на выживаемость лактобацилл. При этом отмечена не только видовая, но и штаммовая специфичность этого эффекта [5,15].

Перспективным направлением в увеличении уровня выживаемости бактерий в процессе замораживания, сушки и хранения является использование различных криопротекторных веществ, обеспечивающих повышение стабилизирующих свойств компонентов клеточной мембраны и комплексной устойчивости клеток. Поиску криопротекторов для повышения выживаемости молочнокислых бактерий, в т. ч. лактобацилл, при лиофилизации посвящено большое количество исследований в связи с их широким использованием в составе бактериальных заквасок для производства пищевых продуктов и пробиотических препаратов [16–18]. Многие криопротекторы уже длительное время применяются в промышленных условиях, хотя механизм их защитного действия остаётся не до конца понятным, но эффективность подтверждена эмпирически. В одном из современных научных обзоров Rockinger с соавторами [2] констатируют, что еще нет однозначных подходов к вопросу защиты клеток от повреждений при сублимации и это научная область все еще основана на эмпирической проверке различных теорий и криопротекторов. И пока не существует универсального «защитного коктейля», не смотря на явные положительные эффекты различных веществ. Однако авторы отмечают, что наиболее универсальным средством в стабилизации не только бактерий, но и любого типа живых клеток при лиофильной сушке является трегалоза, хотя и сахароза или гидроксипропилкрахмал, по их мнению, показали хорошие результаты [2].

В качестве криопротекторов при сублимационной сушке молочнокислых бактерий используются различные вещества: обезжиренное молоко, сахароза, трегалоза, лактоза, глюкоза, сорбит, мальтодекстрин и др. [19–22]. Защитный эффект этих веществ обусловлен ингибированием образования кристаллов льда внутри бактериальных клеток и денатурации белков, что приводит к уменьшению повреждений и гибели клеток.

Часто в качестве криопротекторов используются дисахариды. Углеводы стабилизируют клеточные мембраны во время сушки за счёт вытеснения молекул воды. Согласно теории стеклования углеводы могут проникать в пространство между клеточной стенкой и цитоплазматической мембраной, в результате чего уменьшаются механические повреждения растущими кристаллами льда. Исходя из этого такие углеводы, как сахароза, трегалоза, лактоза и др., считаются хорошими криопротекторами при лиофилизации [8,13].

Исследования с использованием внеклеточных полисахаридов, внутриклеточных совместимых растворов, а также межмембранных защитных веществ и материалов, обволакивающих клеточную мембрану, позволили выявить различные механизмы уменьшения повреждений и повышения устойчивости бактерий в процессе лиофилизации. Кроме того установлено, что микроорганизмы в ответ на стрессовые воздействия, включая холод, запускают адаптивные механизмы, в частности, изменение состава жирных кислот клеточной мембраны и накопление совместимых веществ [1,10]. И при этом одним из самых распространённых способов адаптации к стрессу является внутриклеточное накопление дисахаридов трегалозы, лактозы, сахарозы [23,24].

Из технологических факторов процесса лиофилизации большое влияние на выживаемость бактерий оказывает температура замораживания. В различных исследованиях приводятся данные о различном влиянии режима замораживания и криопротекторных веществ, а также сочетания этих параметров. Но пока не сформировалось однозначное мнение о главенствующей роли одного из этих факторов в сохранении жизнеспособности и стабильности метаболической активности микроорганизмов [6,14,25].

Целью данной работы является изучение влияния различных режимов предварительного замораживания и криопротекции на выживаемость и сохранение метаболической активности мезофильных молочнокислых палочек вида *Lactiplantibacillus plantarum* при лиофилизации и последующем длительном хранении.

2. Объекты и методы

Объектами исследования были штаммы из коллекции ВНИИМС *L. plantarum* штамм 28 (далее PL28) и *L. plantarum* штамм 37 (далее PL37), как представительные микроорганизмы вида *Lactiplantibacillus*. Данные штаммы занимают важное место в составе коллекционного фонда, так как обладают ценными производственными свойствами и используются для изготовления бактериальных заквасок для сыров.

Подготовку культур к исследованию проводили путем культивирования в 10% восстановленном стерильном обезжиренном молоке, приготовленном из сухого обезжиренного молока (ГОСТ 52791–2007¹ АО «Учебно-опытный молочный завод» г. Вологда), с 0,2% дрожжевого автолизата и 0,1% твин 80 в течение 16 ч при температуре (37 ± 1) °C. Инокулятом служили культуры, выращенные в течение 16 ч при температуре (37 ± 1) °C в жидкой среде MRS — по ГОСТ 33951–2016².

В стерильные флаконы вносили молочные культуры в количестве 1 см³, флаконы закрывали стерильными вакуумными резиновыми пробками и замораживали в течение 1 часа при трёх температурных режимах: минус (20 ± 1) °C, минус (30 ± 1) °C, минус (55 ± 1) °C. Замораживание образцов проводили в низкотемпературном морозильнике с принудительной циркуляцией воздуха ILKA SGS300/1000 (VEB ELEKTRO-ANLAGENBAU, Германия). В вариантах с криопротекторами во флаконы вносили 0,8 см³ культуры и 0,2 см³ раствора криопротектора концентрацией 20% в соотношении 4:1. Замораживание проводили при тех же режимах.

Лиофильную сушку культур проводили на колпаковой лиофильной сушилке серии Scientz-10N/10ND в исполнении Top-Press (NINGBO Scientz Bio-technology CO, Китай) с температурой конденсатора до –55 °C и предельным остаточным давлением 10 Па в течение (5,5 ± 0,5) ч при заданных параметрах и досушивали в течение (2,5 ± 0,5) часов при температуре (25 ± 1) °C.

Количество жизнеспособных клеток в процессе проведения экспериментов перед замораживанием, после замораживания и после сушки определяли по ГОСТ 33951–2016 на среде MRS с культивированием в анаэробе «Small» (Schuett, Германия) в течение 72-х часов.

Реактивацию лиофилизированных культур осуществляли ресуспендированием в 5 см³ 10%-ного стерильного восстановленного обезжиренного молока и культивированием при температуре (37 ± 1) °C до сквашивания. Метаболическую активность оценивали после 2-х кратных перевивок реактивированной культуры по снижению активной кислотности молока при культивировании в течение 8 ч при температуре (37 ± 1) °C.

Активную кислотность молока определяли по ГОСТ 32892–2014³ на pH-метре STARTER2100 с пределом погрешности ±0,01 ед. pH (ОНАУС, Китай).

В экспериментах использовали три варианта криопротекторной защиты. В первом варианте (контрольном) криопротекторной защитой являлась сама среда культивирования на основе сухого обезжиренного молока, во втором варианте использовали раствор сахарозы (МСД Кемикал, г. Москва) и в третьем раствор трегалозы (Gold AS, Китай).

Для определения влияния условий лиофильной сушки на выживаемость и метаболическую активность молочнокислых палочек, были разработаны и проведены полные двухфакторные трёхуровневые эксперименты на двух этапах — после замораживания исследуемых культур и после завершения их лиофильной сушки. Выходными (определяемыми) величинами в эксперименте были выживаемость и метаболическая активность молочнокислых палочек. В качестве влияющих факторов в эксперименте первым фактором была выбрана и использована температура замораживания культуры: минус 20 °C, минус 30 °C, минус 55 °C. Вторым влияющим фактором являлось использование криопротекторов: отсутствие криопротектора (контроль), 20% раствор сахарозы в соотношении 4:1 и 20% раствор трегалозы в соотношении 4:1.

Статистический анализ полученных экспериментальных данных проводили с использованием программы Microsoft Office Excel, 2019. Влияние действующих факторов на выживаемость и метаболическую активность молочнокислых бактерий определяли двухфакторным дисперсионным анализом с повторениями.

Достоверность полученных результатов обеспечивали трехкратным повторением каждого эксперимента и оценке воспроизво-

димости полученных результатов с помощью критериев Кохрена и Стьюдента при уровне значимости $p < 0,05$.

3. Результаты и обсуждение

3.1. Изучение влияния температуры замораживания и криопротекции на выживаемость культуры PL28

Результаты определения влияния температуры замораживания и вида криопротектора на выживаемость культуры PL28 после предварительной стадии лиофильной сушки — замораживания приведены в Таблице 1. После завершения экспериментов были рассчитаны средние значения выживаемости бактерий и выборочные дисперсии для каждой группы полученных результатов.

Оценка воспроизводимости этого эксперимента была проведена с использованием G-критерия Кохрена для уровня значимости $p < 0,05$:

$$G_{\text{экс}} = \frac{S_{i \max}^2}{\sum_{i=1}^n S_i^2}, \quad (1)$$

где: $S_{i \max}^2$ — максимальное значение выборочной дисперсии по выживаемости в этом эксперименте.

Рассчитанное значение критерия Кохрена $G_{\text{экс}} = 0,26$, что меньше его табличного критического значения $G_{\text{кр}} = 0,4775$. Таким образом, подтверждается гипотеза об однородности дисперсий, т. е. эксперимент воспроизводим. Дисперсия воспроизводимости $S_{\text{воспр}}^2$ эксперимента в целом оценена как:

$$S_{\text{воспр}}^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_i^2, \quad (2)$$

Откуда $S_{\text{воспр}}^2 = 29,16$, т. е. стандартное отклонение (S_y) результата эксперимента на этом этапе его проведения составляет 5,4%.

Таблица 1. Влияние температуры замораживания и криопротекции на выживаемость культуры PL28 после замораживания

Table 1. Effect of freezing temperature and cryoprotection on survival of culture PL28 after freezing

Условия замораживания			Криопротектор					
			Контроль		Сахароза		Трегалоза	
Температура, °С	Параметр	KOE _{исх}	KOE	% выж.	KOE	% выж.	KOE	% выж.
минус (55 ± 1)	Y ₁₁	1280	1180	92,2	875	68,4	820	64,1
	Y ₁₂	1200	1020	85,0	850	70,8	800	66,7
	Y ₁₃	1050	980	93,3	738	70,2	688	65,5
	\bar{Y}_1	1177	1060	90,2	821	69,8	769	65,4
	S _i ²	—	—	20,4	—	1,7	—	1,7
минус (30 ± 1)	Y ₁₁	1350	820	60,7	750	55,6	1050	77,8
	Y ₁₂	1050	780	74,3	705	69,1	900	85,7
	Y ₁₃	1240	790	63,7	695	56,0	920	74,2
	\bar{Y}_1	1213	797	66,2	717	60,2	957	79,2
	S _i ²	—	—	50,8	—	58,6	—	34,7
минус (20 ± 1)	Y ₁₁	1410	1010	78,3	1062	75,4	738	52,3
	Y ₁₂	1540	1080	70,1	1100	71,4	625	40,6
	Y ₁₃	1380	990	71,7	1060	76,8	780	56,5
	\bar{Y}_1	1443	1027	73,4	1074	74,5	714	49,8
	S _i ²	—	—	18,6	—	7,8	—	68,2

где: KOE — количество колониеобразующих единиц, KOE_{исх} — исходное KOE, %выж — процент выживших KOE, Y_{ij} — значения выходных параметров, i — номер эксперимента, j — часть эксперимента. \bar{Y}_i — средние значения параметра, S_i^2 — выборочные дисперсии значений выживаемости \bar{Y}_i .

Значимость и существование взаимосвязи влияния действующих факторов на выживаемость молочнокислых бактерий после замораживания определяли типовым двухфакторным дисперсионным анализом с повторениями. Результаты этого анализа представлены в Таблице 2.

¹ ГОСТ 52791–2007 «Консервы молочные. Молоко сухое. Технические условия». М.: Стандартинформ, 2008. — 10 с.

² ГОСТ 33951–2016 «Молоко и молочные продукты. Методы определения молочнокислых микроорганизмов». М.: Стандартинформ, 2016. — 15 с.

³ ГОСТ 32892–2014 «Молоко и молочная продукция. Метод измерения активной кислотности». М.: Стандартинформ, 2015. — 10 с.

Таблица 2. Значимость влияния температуры замораживания и криопротекции на выживаемость бактерий PL28 после замораживания

Table 2. Significance of an effect of freezing temperature and cryoprotection on survival of bacteria PL28 after freezing

Источник вариаций	F	p-значение	F-критическое
Температура	6,957	$5,772 \cdot 10^{-03}$	3,554
Криопротекторы	11,316	$6,570 \cdot 10^{-04}$	3,554
Взаимодействие	18,137	$3,979 \cdot 10^{-06}$	2,927

Исходя из результатов проведённого дисперсионного анализа можно сделать вывод о том, что температура замораживания бактерий и вид криопротектора имеют значимое влияние на выживаемость клеток ($p \ll 0,05$). Кроме того, значимое влияние имеет и сочетание определённой температуры с определённым криопротектором. Для визуальной оценки характера этого влияния на выживаемость клеток при замораживании приведён Рисунок 1.

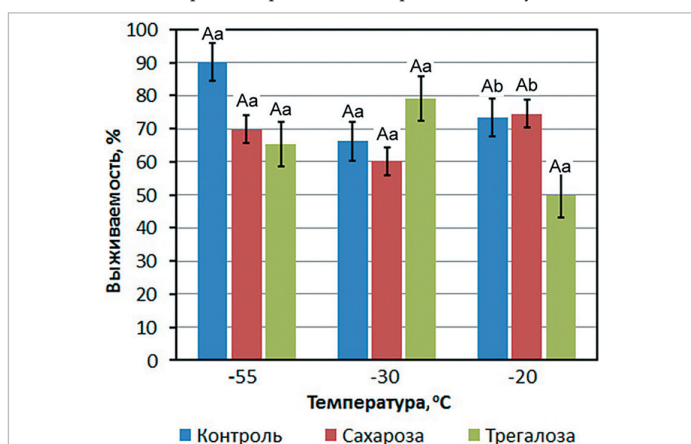


Рисунок 1. Влияние температуры замораживания и криопротекции на выживаемость бактерий PL28 после замораживания

Figure 1. Effect of freezing temperature and cryoprotection on survival of bacteria PL28 after freezing

Примечание: индексы (A) показывает статистически значимые различия ($p < 0,05$) внутри групп криопротекторов при различных температурах замораживания; индекс (a) показывают значимые различия ($p < 0,05$), (b) — отсутствие различий внутри групп криопротекторов при одинаковых температурах замораживания.

Как видно из приведенного Рисунка 1 и Таблицы 1, максимальное выживание бактерий PL28 при замораживании обеспечивается при температуре минус 55 °C без использования криопротектора. Отсюда следует, что характер действия трегалозы, как криопротектора, совершенно иной и наилучшие результаты при его использовании достигаются при температуре минус 30 °C.

В Таблице 3 приведены результаты определения влияния температуры предварительного замораживания и вида криопротектора на выживаемость и метаболическую активность культуры PL28 после окончания полного цикла лиофильной сушки. После завершения экспериментов были рассчитаны средние значения выживаемости бактерий и выборочные дисперсии для каждой группы полученных результатов.

Оценка воспроизводимости этого эксперимента в целом, также как и ранее, была проведена с использованием G-критерия Кохрена на уровне значимости $p < 0,05$ по формулам (1) и (2) отдельно для выживаемости и метаболической активности. Рассчитанное значение критерия Кохрена по этой таблице для оценки выживаемости бактерий $G_{\text{жс}} = 0,19$, что меньше его табличного критического значения $G_{\text{кр}} = 0,4775$. Также был рассчитан критерий Кохрена для оценки изменения метаболической активности бактерий после сушки, его значение $G_{\text{жс}} = 0,185$, что также меньше его табличного критического значения $G_{\text{кр}} = 0,4775$. Таким образом, подтверждается гипотеза об однородности дисперсий, т. е. эксперимент в целом воспроизводим.

Дисперсия воспроизводимости эксперимента в целом оценена по (2) и составляет $S^2_{\text{воспр}} = 14,39$ для выживаемости и $S^2_{\text{воспр}} = 0,001$ для метаболической активности. Откуда стандартное отклонение (S_y) результата эксперимента в целом по выживаемости бактерий составляет 3,8% и находится в пределах инструментальной погрешности прибора для измерения pH при оценке метаболической активности бактерий.

Таблица 3. Влияние температуры замораживания и криопротекции на выживаемость и метаболическую активность культуры PL28 после лиофильной сушки

Table 3. Effect of freezing temperature and cryoprotection on survival and metabolic activity of culture PL28 after freeze-drying

Условия эксперимента	Вид криопротектора	Параметр						
			Контроль	Сахароза	Трегалоза			
Температура замораживания, °C			%выж.	ΔpH	%выж.	ΔpH	%выж.	ΔpH
минус (55 ± 1)		Y ₁₁	25,78	0,34	41,25	0,4	32,03	0,36
		Y ₁₂	23,33	0,29	37,5	0,35	33,33	0,37
		Y ₁₃	23,81	0,38	45,24	0,43	26,19	0,41
		\bar{Y}_1	24,31	0,337	41,33	0,393	30,52	0,38
		S^2_i	1,686	0,002	14,98	0,002	14,46	7 · 10⁻⁰⁴
минус (30 ± 1)		Y ₁₁	28,15	0,36	52,78	0,33	68,52	0,37
		Y ₁₂	33,33	0,42	57,52	0,42	61,9	0,43
		Y ₁₃	33,87	0,4	50,64	0,39	62,09	0,41
		\bar{Y}_1	31,78	0,393	53,65	0,38	64,17	0,403
		S^2_i	9,974	9 · 10⁻⁰⁴	12,4	0,002	14,2	9 · 10⁻⁰⁴
минус (20 ± 1)		Y ₁₁	41,84	0,32	50,35	0,38	46,1	0,45
		Y ₁₂	35,06	0,41	40,58	0,43	36,49	0,42
		Y ₁₃	40,57	0,37	46,37	0,41	39,13	0,4
		\bar{Y}_1	39,16	0,367	45,77	0,407	40,57	0,423
		S^2_i	12,99	0,002	24,14	6 · 10⁻⁰⁴	24,65	6 · 10⁻⁰⁴

где: КОЕ — количество колониеобразующих единиц, %выж — процент выживших КОЕ, ΔpH — изменение метаболической активности, Y_{ij} — значения выходных параметров, i — номер эксперимента, j — часть эксперимента. \bar{Y}_i — средние значения параметра, S^2_i — выборочные дисперсии значений \bar{Y}_i .

Значимость и существование взаимосвязи влияния действующих факторов на выживаемость молочнокислых бактерий и изменение метаболической активности после замораживания и окончательной лиофильной сушки также определяли двухфакторным дисперсионным анализом с повторениями. Результаты этого анализа представлены в Таблице 4.

Таблица 4. Значимость влияния температуры замораживания и криопротекции на выживаемость и метаболическую активность бактерий PL28 после замораживания и лиофилизации

Table 4. Significance of the effect of freezing temperature and cryoprotection on survival and metabolic activity of bacteria PL28 after freezing and freeze-drying

Источник вариаций	F	p-значение	F-критическое
Выживаемость			
Температура	49,798	$4,611 \cdot 10^{-08}$	3,554
Криопротекторы	42,876	$1,423 \cdot 10^{-07}$	3,554
Взаимодействие	16,020	$9,413 \cdot 10^{-06}$	2,927
Метаболическая активность			
Температура	1,593	0,230	3,554
Криопротекторы	2,547	0,106	3,554
Взаимодействие	0,888	0,490	2,927

Результаты проведённого дисперсионного анализа позволяют сделать вывод о том, что температура замораживания бактерий и вид криопротектора имеют значимое влияние на выживаемость клеток после их лиофильной сушки ($p \ll 0,05$). Значимое влияние имеет и сочетание определённой температуры с определённым криопротектором. Визуальную оценку характера этого влияния на выживаемость клеток после замораживания и их лиофильной сушки можно сделать по Рисунку 2.

Как видно из Рисунка 2 и Таблицы 3, максимальное выживание бактерий PL28 после замораживания и лиофильной сушки обеспечивается при температуре –30 °C с использованием трегалозы. Без использования криопротектора результаты наихудшие. Отсюда следует, что характер действия трегалозы, как криопротектора, остается неизменным как при замораживании, так и при сушке, в то время

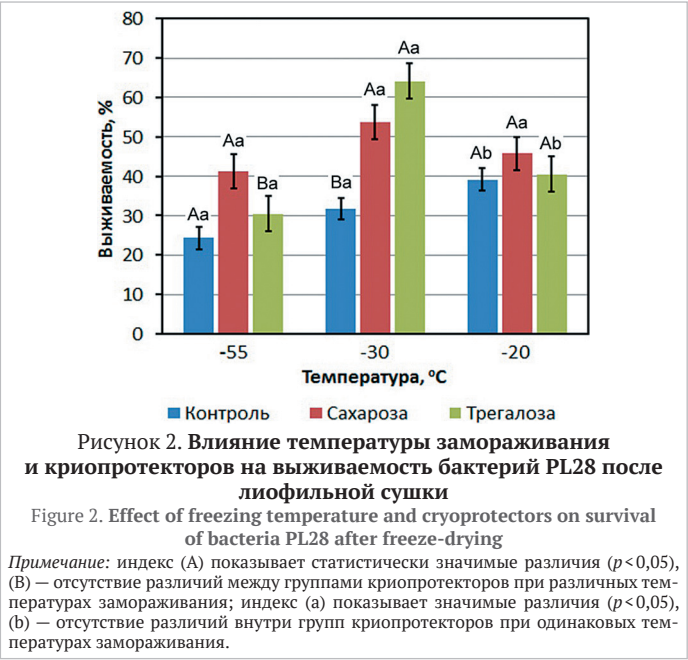


Рисунок 2. Влияние температуры замораживания и криопротекторов на выживаемость бактерий PL28 после лиофильной сушки

Figure 2. Effect of freezing temperature and cryoprotectors on survival of bacteria PL28 after freeze-drying

Примечание: индекс (A) показывает статистически значимые различия ($p < 0,05$), (B) — отсутствие различий между группами криопротекторов при различных температурах замораживания; индекс (a) показывает значимые различия ($p < 0,05$), (b) — отсутствие различий внутри групп криопротекторов при одинаковых температурах замораживания.

как отсутствие криопротектора отрицательно сказывается именно на этапе лиофильной сушки. Использование сахарозы даёт промежуточные результаты.

Влияние температуры и криопротекции на метаболическую активность бактерий PL28 при лиофильной сушке далее не рассматривается, так как дисперсионный анализ (Таблица 4) показал отсутствие статистической значимости результатов этой части эксперимента, $p > 0,05$.

Результаты, полученные в ходе этого эксперимента, позволяют оценить свойства использованных криопротекторов в качестве лиопротекторов, т. е. веществ, повышающих выживаемость бактерий непосредственно в процессе лиофильной сушки. Для этого из результатов по выживаемости после замораживания (Таблица 1) вычитали аналогичные результаты после сушки (Таблица 3) и формировали Таблицу 5.

Таблица 5. Величины гибели бактерий PL28 при лиофильной сушке

Table 5. Levels of death of bacteria PL28 upon freeze-drying

Условия эксперимента		Криопротектор		
		Контроль	Сахароза	Трегалоза
Температура, °C	Параметр	Гибель, %	Гибель, %	Гибель, %
минус (55 ± 1)	Y ₁₁	66,42	27,15	32,07
	Y ₁₂	61,67	33,3	33,37
	Y ₁₃	69,49	24,96	39,31
	Y ₁	65,89	28,47	34,88
	S _i ²	—	—	—
минус (30 ± 1)	Y ₁₁	32,55	2,82	9,28
	Y ₁₂	40,97	11,58	23,8
	Y ₁₃	29,83	5,36	12,11
	Y ₁	34,42	6,55	15,03
	S _i ²	—	—	—
минус (20 ± 1)	Y ₁₁	36,46	25,05	6,2
	Y ₁₂	35,04	30,82	4,11
	Y ₁₃	31,13	30,43	17,37
	Y ₁	34,24	28,73	9,23
	S _i ²	—	—	—

На основе полученных расчётов были построены графики, наглядно демонстрирующие влияние криопротекторов на гибель клеток PL28 при лиофильной сушке (Рисунок 3).

Как видно из Таблицы 5 и Рисунка 3 в любом случае максимальная гибель при лиофилизации наблюдается у клеток культуры PL28, замороженных при минус 55 °C и достигает 60% для клеток без криопротекторов. Использование криопротекторов в тех же условиях почти в два раза снижает гибель, а при замораживании клеток при минус 30 °C снижает гибель более, чем в пять раз. Таким образом, криопротекторы сахароза и трегалоза являются эффективными лиопротекторами для бактерий PL28, предварительно замороженных при температуре минус 3 °C.

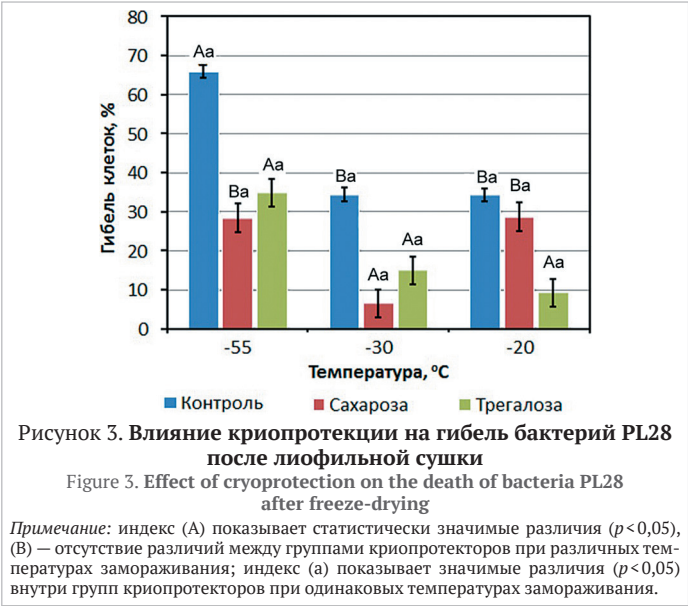


Рисунок 3. Влияние криопротекции на гибель бактерий PL28 после лиофильной сушки

Figure 3. Effect of cryoprotection on the death of bacteria PL28 after freeze-drying

Примечание: индекс (A) показывает статистически значимые различия ($p < 0,05$), (B) — отсутствие различий между группами криопротекторов при различных температурах замораживания; индекс (a) показывает значимые различия ($p < 0,05$) внутри групп криопротекторов при одинаковых температурах замораживания.

3.2. Изучение влияния температуры замораживания и характера криопротекции на выживаемость и метаболическую активность культуры PL37

Во второй части эксперимента исследовали культуру *L. plantarum* PL37. Для этого были проведены такие же, как и в первой части работы, двухфакторные трёхуровневые эксперименты с повторениями с теми же влияющими факторами. Результаты первого этапа этого эксперимента приведены в Таблице 6.

Таблица 6. Результаты определения влияния температуры замораживания и характера криопротекции на выживаемость PL37 после замораживания

Table 6. Results of determining an effect of freezing temperature and character of cryoprotection on survival on PL37 after freezing

Условия замораживания		Криопротектор					
		Контроль		Сахароза		Трегалоза	
Температура, °C	Параметр	KOE _{исх}	KOE	%выж	KOE	%выж	KOE
минус (55 ± 1)	Y ₂₁	1400	1081	77,21	1311	93,65	1550
	Y ₂₂	1295	1015	78,38	1175	90,75	1363
	Y ₂₃	1350	988	73,22	1192	88,28	1420
	Y ₂	1348	1028	76,27	1226	90,89	1444
	S _i ²	—	—	7,31	—	7,22	—
минус (30 ± 1)	Y ₂₁	1530	1308	85,48	850	55,55	809
	Y ₂₂	1670	1383	82,82	890	53,32	804
	Y ₂₃	1570	1254	79,85	799	50,90	791
	Y ₂	1590	1315	82,72	846	53,26	801
	S _i ²	—	—	7,93	—	5,41	—
минус (20 ± 1)	Y ₂₁	1740	1466	84,24	954	54,82	663
	Y ₂₂	1825	1628	89,23	905	49,62	850
	Y ₂₃	1780	1535	86,22	860	52,75	880
	Y ₂	1782	1543	86,56	906	52,40	798
	S _i ²	—	—	6,31	—	6,85	—

где: KOE — количество колониеобразующих единиц, %выж — процент выживших KOE, ΔpH — изменение метаболической активности, Y_{ij} — значения выходных параметров, i — номер эксперимента, j — часть эксперимента. Y_i — средние значения параметра, S_i² — выборочные дисперсии значений Y_i.

Оценка воспроизводимости этого эксперимента также была проведена с использованием G-критерия Кохрена по формуле (1) для уровня значимости α = 0,05. Рассчитанное значение критерия Кохрена G_{крит} = 0,31, что меньше его табличного критического значения G_{кр} = 0,4775. Таким образом, подтверждается гипотеза об однородности дисперсий, т. е. эксперимент воспроизводим. Дисперсия воспроизводимости эксперимента в целом определена по формуле (2),

её значение $S_{воспр}^2 = 37,74$ т. е. стандартное отклонение (S_y) результата на этом этапе эксперимента составляет 6,15 %.

Значимость и существование взаимосвязи влияния действующих факторов на выживаемость молочнокислых бактерий (PL37) после замораживания также определяли двухфакторным дисперсионным анализом с повторениями. Результаты этого анализа представлены в Таблице 7.

Таблица 7. Значимость влияния температуры замораживания и криопротекторов на выживаемость бактерий PL37 после замораживания

Table 7. Significance of an effect of freezing temperature and cryoprotectors of survival of bacteria PL37 after freezing

Источник вариаций	F	p-значение	F-критическое
Температура	222,52	$2,02 \cdot 10^{-13}$	3,554
Криопротекторы	181,32	$1,18 \cdot 10^{-12}$	3,554
Взаимодействие	109,75	$2,19 \cdot 10^{-12}$	2,927

Полученные результаты дисперсионного анализа показывают, что температура замораживания бактерий и вид криопротектора имеют значимое влияние на выживаемость клеток, $p \ll 0,05$. Также значимое влияние имеет и сочетание определённой температуры с определённым криопротектором. Для иллюстрации характера этого влияния на выживаемость клеток после замораживания приведён Рисунок 4.

Как видно из Рисунка 4 и Таблицы 6, максимальная выживаемость бактерий PL37 при замораживании обеспечивается при температуре -55°C с использованием криопротектора сахарозы. Отсюда следует, что характер действия трегалозы на выживаемость PL37 при замораживании совпадает с действием сахарозы, но это действие несколько слабее. При более высоких температурах замораживания действие этих криопротекторов ослабевает и при температуре -20°C наилучшая выживаемость достигается без их использования.

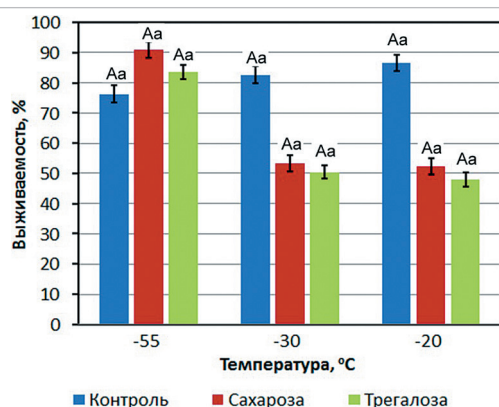


Рисунок 4. Влияние температуры замораживания и криопротекции на выживаемость бактерий PL37 после их замораживания

Figure 4. Effect of freezing temperature and cryoprotection on survival of bacteria PL37 after their freezing

Примечание: индекс (A) показывает статистически значимые различия ($p < 0,05$) между группами криопротекторов при различных температурах замораживания; индекс (a) показывает значимые различия ($p < 0,05$) внутри групп криопротекторов при одинаковых температурах замораживания.

Если сравнивать результаты влияния вида криопротекторов при различных температурах при замораживании на выживаемость культур PL28 и PL37, то нетрудно заметить, что условия их максимальной выживаемости различаются, что предполагает штаммовое разнообразие в устойчивости бактериальных культур к замораживанию.

В Таблице 8 приведены результаты определения влияния температуры замораживания и характера криопротекции на выживаемость и метаболическую активность молочнокислых бактерий (PL37) после окончания лиофильной сушки. После завершения экспериментов были рассчитаны средние значения выживаемости бактерий и выборочные дисперсии для каждой группы полученных результатов.

Оценка воспроизводимости этого эксперимента в целом была проведена с использованием G-критерия Кохрена на уровне значимости $p < 0,05$ по формулам (1) и (2). Рассчитанное значение критерия Кохрена по этой таблице для оценки выживаемости бактерий $G_{экс} = 0,19$, что меньше его табличного критического значения $G_{кр} = 0,4775$. Таким образом, подтверждается гипотеза об однородности дисперсий, т. е. эксперимент в целом воспроизводим.

Таблица 8. Влияние температуры замораживания и характера криопротекции на выживаемость и метаболическую активность культуры PL37 после лиофильной сушки

Table 8. Effect of freezing temperature and character of cryoprotection on survival and metabolic activity of culture PL37 after freeze-drying

Условия замораживания			Криопротектор					
			Контроль		Сахароза		Трегалоза	
Температура, °C	Параметр	КОЕисх	КОЕ	%выж	КОЕ	%выж	КОЕ	%выж
минус (55 ± 1)	Y ₂₁	1400	753	53,80	975	56,84	707	50,51
	Y ₂₂	1295	597	46,10	796	53,55	676	52,2
	Y ₂₃	1350	695	51,45	733	54,32	651	48,25
	Ȳ ₂	1348	682	50,45	835	54,90	678	50,32
	S _i ²	—	—	15,57	—	2,96	—	3,92
минус (30 ± 1)	Y ₂₁	1530	395	41,95	793	51,86	761	49,74
	Y ₂₂	1670	530	38,54	799	47,82	775	46,85
	Y ₂₃	1570	490	44,15	858	54,65	831	52,95
	Ȳ ₂	1590	472	41,55	817	51,44	789	49,85
	S _i ²	—	—	7,99	—	11,79	—	9,31
минус (20 ± 1)	Y ₂₁	1740	290	20,94	535	30,72	560	32,19
	Y ₂₂	1825	380	23,25	814	34,50	618	33,88
	Y ₂₃	1780	325	24,85	634	35,64	645	36,25
	Ȳ ₂	1782	332	23,01	661	33,62	608	34,11
	S _i ²	—	—	3,86	—	6,63	—	4,15

где: KOE — количество колониеобразующих единиц, %выж — процент выживших KOE, ΔpH — изменение метаболической активности, Y_{ij} — значения выходных параметров, i — номер эксперимента, j — часть эксперимента. \bar{Y}_i — средние значения параметра, S_i^2 — выборочные дисперсии значений Y_i

Дисперсия воспроизводимости эксперимента в целом оценена по (2) и составляет $S_{воспр}^2 = 14,39$ для выживаемости. Откуда стандартное отклонение (S_y) результата этого эксперимента в целом по выживаемости бактерий составляет 3,8 %.

Значимость и существование взаимосвязи влияния действующих факторов на выживаемость молочнокислых бактерий (PL37) после замораживания и лиофильной сушки также определяли двухфакторным дисперсионным анализом с повторениями. Результаты этого анализа представлены в Таблице 9.

Таблица 9. Значимость влияния температуры замораживания и криопротекторов на выживаемость бактерий PL37 после замораживания и лиофилизации

Table 9. Significance of an effect of freezing temperature and cryoprotectors on survival of bacteria PL37 after freezing and lyophilization

Источник вариаций	F	p-значение	F-критическое
Температура	160,74	$3,31 \cdot 10^{-12}$	3,554
Криопротекторы	23,25	$1,02 \cdot 10^{-5}$	3,554
Взаимодействие	3,53	0,026	2,927

Полученные результаты дисперсионного анализа показывают, что температура замораживания бактерий и вид криопротектора имеют значимое влияние ($p \ll 0,05$) на выживаемость клеток после лиофилизационной сушки. Также значимое влияние имеет и сочетание определённой температуры с определённым криопротектором. Для иллюстрации характера этого влияния на выживаемость клеток после замораживания приведён Рисунок 5.

Из приведённого Рисунка 5 видно, что для бактерий PL37 зависимость выживаемости от использования криопротекторов или их отсутствия при лиофилизации имеет схожий характер, при этом несколько большая выживаемость наблюдается с использованием сахарозы, а наихудший результат, в любом случае, получен при замораживании минус 20°C .

Оценка действия криопротекторов как лиопротекторов была проведена также, как и в первой части работы. Для этого из результатов по выживаемости после замораживания (Таблица 6) вычитали аналогичные результаты после лиофильной сушки (Таблица 8), а полученные результаты сводили в таблицу (Таблица 10).

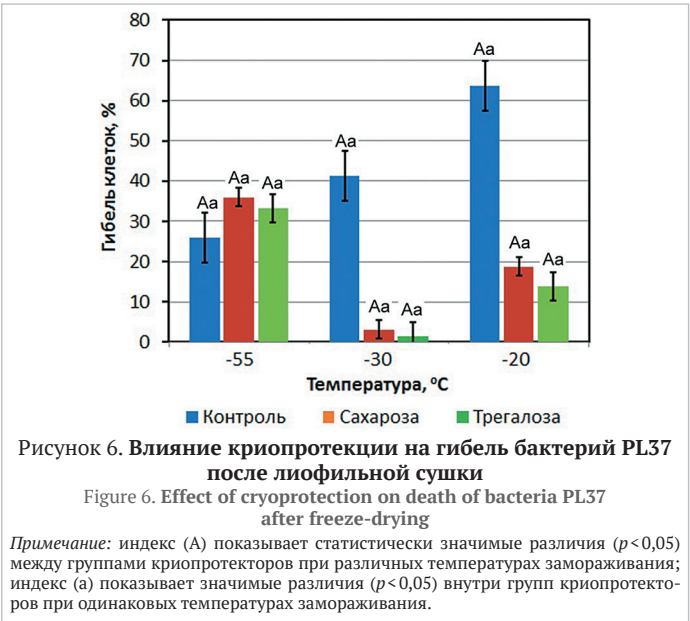
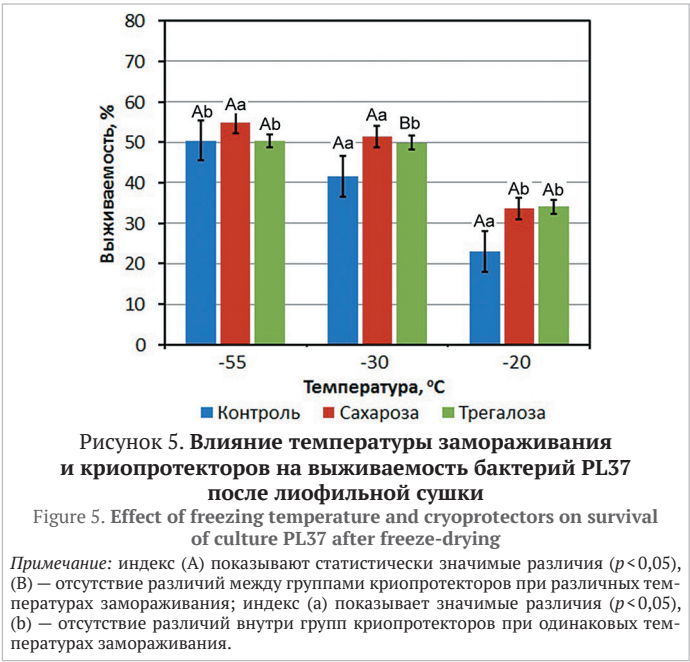


Таблица 10. Величины гибели бактерий PL37 при лиофильной сушке

Условия эксперимента		Криопротектор		
Температура, °C	Параметр	Контроль	Сахароза	Трегалоза
		Гибель, %	Гибель, %	Гибель, %
минус (55 ± 1)	Y ₁₁	23,41	36,81	35,64
	Y ₁₂	32,28	37,20	31,07
	Y ₁₃	21,77	33,96	32,80
	Y ₁	25,82	35,99	33,17
	Y ₁₄	21,77	33,96	32,80
минус (30 ± 1)	Y ₁₁	43,53	3,69	3,13
	Y ₁₂	44,28	5,50	1,29
	Y ₁₃	35,7	0,00	0,00
	Y ₁	41,17	3,06	1,47
	Y ₁₄	35,7	0,00	0,00
минус (20 ± 1)	Y ₁₁	63,3	24,10	15,40
	Y ₁₂	65,98	15,12	12,70
	Y ₁₃	61,37	17,11	13,17
	Y ₁	63,55	18,78	13,76
	Y ₁₄	61,37	17,11	13,17

На основе данных Таблицы 10 были построены графики, демонстрирующие влияние криопротекторов на гибель клеток PL37 при лиофильной сушке (Рисунок 6). Как видно из Таблицы 10 и Рисунок 6, максимальная гибель при лиофилизации наблюдается для клеток без криопротекторов, замороженных при минус 55 °C и составляет более 60 %. Использование криопротекторов резко меняет зависимость уровня гибели клеток от температуры замораживания. Действие криопротекторов имеет сходный характер и достигает максимального эффекта для клеток, замороженных при температуре -30 °C, снижая их гибель до единиц процентов. В тоже время замораживание клеток при минус 55 °C сопровождается повышенной гибелью бактерий при использовании криопротекторов. Таким образом, для бактериальной культуры PL37 криопротекторы сахароза и трегалоза являются эффективными лиопротекторами при температуре замораживания близкой к -30 °C.

Таблица 11. Наилучшие условия лиофилизации лактобацилл

Номер штамма	Стадия лиофилизации	Выживаемость		Метаболическая активность	
		Температура, °C	Протектор	Температура, °C	Протектор
PL28	Замораживание	минус (55 ± 1)	Без протектора	—	—
	Сушка	минус (30 ± 1)	Трегалоза	минус (20 ± 1)	Трегалоза
PL37	Замораживание	минус (55 ± 1)	Без протектора	—	—
	Сушка	минус (55 ± 1)	Трегалоза	минус (20 ± 1)	Трегалоза

Таблица 12. Коэффициенты эффективности процесса лиофильной сушки

Table 12. Coefficients of effectiveness of the freeze-drying process

Условия эксперимента		$K_{эф}$ PL28	$K_{эф}$ PL37
Температура замораживания, °C	Вид криопротектора		
минус (30 ± 1)	трегалоза	0,199	0,205
минус (20 ± 1)	трегалоза	0,183	0,231
минус (55 ± 1)	трегалоза	0,168	0,256
минус (30 ± 1)	сахароза	0,178	0,183
минус (20 ± 1)	сахароза	0,161	0,216
минус (55 ± 1)	сахароза	0,144	0,247
минус (30 ± 1)	отсутствует	0,158	0,163
минус (20 ± 1)	отсутствует	0,14	0,201
минус (55 ± 1)	отсутствует	0,122	0,237

3.3. Обсуждение

Сравнение результатов по влиянию температуры замораживания бактерий и характера криопротекции на их выживаемость после замораживания и результатов выживаемости после полного цикла лиофилизации, показало, что наилучшие результаты по выживаемости разных штаммов получены в различных условиях. Так после замораживания максимальная сохранность клеток культуры PL28 составила 90,2% при температуре замораживания минус 55 °C без добавления криопротектора, а после сушки максимально выживало 64,2% при температуре замораживания минус 30 °C с добавлением криопротектора трегалозы. В присутствии сахарозы после сушки наибольшая сохранность жизнеспособности культуры PL28 составила 53,7%. Для штамма PL37 после замораживания выявлена максимальная выживаемость на уровне 90,9% при тех же условиях, но сохранность после сушки была наиболее высокой при температуре минус 55 °C в присутствии трегалозы и составила 54,9%. То есть из двух использованных в эксперименте дисахаридов лучший эффект обеспечило добавление трегалозы, что согласуется с данными других исследователей [11,23].

По-видимому, это связано с тем, что на этапе замораживания происходит кристаллизация влаги вокруг клеток и внутри, а в зависимости от скорости кристаллизации образуются крупные или мелкие кристаллы льда, повреждающие бактериальные клетки. Очевидно, что при очень низких температурах, т. е. высокой скорости замораживания, образуются более мелкие кристаллы, наносящие меньшие повреждения, а отсутствие криопротекторной защитной оболочки также способствует более высокой скорости замораживания.

После замораживания при лиофильной сушке происходит сублимация воды с поверхности бактериальных клеток в условиях низкого давления и подогрева и, возможно, непосредственно из бактериальных клеток, что может вызывать их гибель. В этом случае, наличие эффективного криопротектора, защищающего клетки бактерий от излишнего удаления из них воды, обеспечивает их более высокую сохранность. По сравнению с этим температура замораживания уже оказывает меньшее влияние. Для обоих исследованных штаммов лактобацилл превалирующим фактором на этапе лиофильной сушки является вид криопротектора (или его отсутствие), а не температура замораживания.

Степень выживаемости культур PL28 и PL37 после сушки при разных условиях в нашем исследовании согласуется с результатами других исследований. По данным G.-Q. Wang с соавторами [25] для трёх штаммов *L. plantarum* также показан наибольший защитный эффект трегалозы, самая высокая выживаемость выявлена у двух штаммов после сушки с предварительной температурой замораживания минус 60 °C, а у одного штамма была примерно одинаковой при температуре минус 20, 30 и 60 °C. Показатели выживаемости после сушки также были значительно ниже, чем при замораживании, и также отмечены существенные различия между штаммами. Однако при этом у одного штамма сохранение жизнеспособности было выше, чем у наших культур и достигло около 80% [25]. Другими авторами установлена максимальная криозащита при добавлении 15% трегалозы [26].

В другом исследовании криопротекторы также положительно влияли на выживаемость мезофильных молочнокислых палочек *L. fermentum* после сушки и, что интересно, при длительном хранении. Но наибольший защитный эффект установлен при добавлении к отмытым клеткам лактобацилл 10% обезжиренного молока с 5% глю-

тамата, который составил 100% непосредственно после сушки и 87% после 1 года хранения. Немного меньший эффект получен с 10% обезжиренным молоком (96% и 74% соответственно), а трегалоза практически не оказала защиты — выживаемость составила всего 7% [11].

Имеются данные и о значительном защитном эффекте других видов и концентраций криопротекторов. Kavak с соавторами [27] выявили самую высокую выживаемость пробиотического штамма *L. plantarum* NBC99 при лиофильной сушке с комплексной защитной средой, содержащей 25% обезжиренного молока, 8,71% мальтодекстрина и 1,13% сахарозы. Спектр криопротекторов продолжает расширяться. В 2022 г. впервые был оценен защитный потенциал различных биомасс микроводорослей для пробиотических лактобацилл (*L. acidophilus* La-05 и *L. casei* Lc-01) при сублимации и хранении. Биомасса микроводорослей обладала таким же или более выраженным криопротекторным потенциалом в части предотвращения повреждения целостности мембран клеток и выживаемости, чем признанный криопротектор — фруктоолигосахарид, и эти эффекты варьировались у исследуемых штаммов [28]. В других случаях установлено улучшение защитного действия обезжиренного молока при добавлении различных веществ: 1% экстракта кожуры граната при сублимации *Lactobacillus gasseri* H87 [29]; 2% диоксида кремния [30]. При исследовании в качестве криопротекторов 10% сиропа агавы и смесей, состоящих из 5% сахарозы и 5% трегалозы; 10% обезжиренного молока, 1% глюкозы и 0,5% дрожжевого экстракта; 0,1% пептона и 1,2% сорбита, при сублимационной сушке *L. plantarum* ATCC14917 было обнаружено улучшение выживаемости в вариантах с первыми тремя протекторами с высоким содержанием сахаров и/или белка [31]. Была определена способность рисового белка, дополненного различными пребиотиками, защищать *L. plantarum* TISTR2075 при лиофильной сушке и последующем хранении, при этом комбинация рисового белка и фруктоолигосахаридов обеспечивала наилучшую стабильность при хранении с наименьшей удельной скоростью гибели клеток [32].

Это свидетельствует о необходимости индивидуального подбора криопротекторов не только к различным видам микроорганизмов, но и к индивидуальным штаммам и согласуется с мнением Rockinger с соавторами [2] об отсутствии универсальных криопротекторов. С учётом того, что в наших условиях бактериальные клетки культивировали в 10% обезжиренном молоке с 0,2% дрожжевого автолизата и 0,1% твин 80 и не отделяли их от молочной среды, в экспериментах не использовали комплексных защитных сред, добавление отдельных дисахаридов было вполне обоснованным и дало положительный эффект по сравнению с сушкой культур в молоке без криопротекторов.

4. Заключение

Проведённые исследования позволили выявить различия во влиянии режимов предварительного замораживания и характера криопротекции на коллекционные культуры *L. plantarum* 28 и 37, их выживаемость и метаболическую активность.

Определено, что превалирующим фактором, влияющим на сохранение жизнеспособности этих культур, является вид криопротектора или его отсутствие. Температура предварительного замораживания менее значима и специфична для каждого штамма. Лучшие показатели выживаемости получены с применением в качестве криопротектора 20% раствора трегалозы в соотношении 4:1 при лиофилизации обоих исследуемых штаммов *L. plantarum*. Максимальная выживаемость культур *L. plantarum* 28 достигается в присутствии трегалозы при замораживании при температуре минус 30 °C, культуры *L. plantarum* 37 также в присутствии трегалозы при замораживании при температуре минус 55 °C.

Исследования показали возможность увеличения выживаемости коллекционных культур в процессе лиофилизации за счет добавления определённых криопротекторов и использования оптимальных режимов предварительного замораживания при их консервации.

Полученные результаты важны не только для разработки индивидуальных режимов лиофилизации и сохранения ценных коллекционных культур, но и для практического использования в промышленной технологии при производстве моновидовых бактериальных заквасок, так как именно исследованные штаммы и входят в состав этих заквасок.

В перспективе дальнейших исследований планируется проведение экспериментальных работ по выработке бактериальных концентрированных заквасок в производственных условиях, на основании которых будут разработаны рекомендации по выбору режимов предварительного замораживания и характера криопротекции других штаммов и видов коллекционных культур.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / REFERENCES

- Охупкина, В. Ю. (2009). Методы поддержания микробных культур. Часть 2. Лиофилизация. *Теоретическая и прикладная экология*, 4, 21–32. [Okhapkina, V. Yu. (2009). Methods of microbe cultures maintenance. Part 2. Liophilisation. *Theoretical and Applied Ecology*, 4, 21–32. (In Russian)]
- Rockinger, U., Funk, M., Winter, G. (2021). Current approaches of preservation of cells during (freeze-) drying. *Journal of Pharmaceutical Sciences*, 110(8), 2873–2893. <https://doi.org/10.1016/j.xphs.2021.04.018>
- Wang, J., Chen, L. (2021). Impact of a novel nano-protectant on the viability of probiotic bacterium *Lactobacillus casei* K17. *Foods*, 10(3), Article 529. <https://doi.org/10.3390/foods10030529>
- Papadimitriou, K., Alegria, A., Bron, P. A., de Angelis, M., Gobetti, M., Kleerebezem, M. et al. (2016). Stress physiology of lactic acid bacteria. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, 80(3), 837–890. <https://doi.org/10.1128/mmb.00076-15>
- Cheng, Z., Yan, X., Wu, J., Weng, P., Wu, Z. (2022). Effects of freeze drying in complex lyoprotectants on the survival, and membrane fatty acid composition of *Lactobacillus plantarum* L1 and *Lactobacillus fermentum* L2. *Cryobiology*, 105, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.cryobiol.2022.01.003>
- Santivarangkna, C., Kulozik, U., Foerst, P. (2008). Inactivation mechanisms of lactic acid starter cultures preserved by drying processes. *Journal of Applied Microbiology*, 105(1), 1–13. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.2008.03744.x>
- Ge, S., Han, J., Sun, Q., Zhou, Q., Ye, Z., Li, P. et al. (2024). Research progress on improving the freeze-drying resistance of probiotics: A review. *Trends in Food Science and Technology*, 147, Article 104425. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2024.104425>
- Reddy, K.B.P.K., Awasthi, S.P., Madhu, A.N., Prapulla, S.G. (2009). Role of cryoprotectants on the viability and functional properties of probiotic lactic acid bacteria during freeze drying. *Food Biotechnology*, 23(3), 243–265. <https://doi.org/10.1080/08905430903106811>
- Синева, А.Н., Терехова, Л.П. (2018). Долгосрочное хранение микроорганизмов. Глава в книге: Результаты исследований естественных и точных наук: междисциплинарный подход и сверхаддитивный эффект. Самара: Поволжская научная корпорация, 2018. [Sineva, A.N., Terekhova, L.P. (2018). Long-term storage of microorganisms. Chapter in a book: Results of the study of natural and exact sciences: Interdisciplinary approach and superadditive effect. Samara: Volga Region's Scientific Corporation, 2018. (In Russian)]
- Rakchai, N., Maneerat, S. (2022). Improved survival of freeze-dried *Lactobacillus pentosus* Sy130 and applied as a Co-culture starter with *Lactobacillus plantarum* KJ03 for fermenting stink bean (Sataw-Dong). *Indian Journal of Microbiology*, 62(2), 215–224. <https://doi.org/10.1007/s12088-021-00997-5>
- Stefanello, R.F., Nabeshima, E.H., Iamanaka, B.T., Ludwig, A., Fries, L.L.M., Bernardi, A.O. et al. (2019) Survival and stability of *Lactobacillus fermentum* and *Wickerhamomyces anomalous* strains upon lyophilisation with different cryoprotectant agents. *Food Research International*, 115, 90–94. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.07.044>
- Nguyen, T. H., Kim, J.-S., Kwon, H.-J., Kang, C.-H. (2023). The effect of a glutathione (Gsh)-Containing cryo-protectant on the viability of probiotic cells using a freeze-drying process. *Fermentation*, 9(2), Article 187. <https://doi.org/10.3390/fermentation9020187>
- Polo, L., Manes-Lazaro, R., Olmeda, I., Cruz-Pio, L.E., Medina, Á., Ferrer, S. et al. (2017). Influence of freezing temperatures prior to freeze-drying on viability of yeasts and lactic acid bacteria isolated from wine. *Journal of Applied Microbiology*, 122(6), 1603–1614. <https://doi.org/10.1111/jam.13465>
- Yang, Y., Wang, R.-X., Yang, Y.-X., E, J.-J., Wang, J.-G. (2022). Effects of different prefreezing temperatures on the freeze-drying survival rate and stability during room temperature storage of *Lactiplantibacillus plantarum* LIP-1. *Food Bioscience*, 50, Article 102087. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2022.102087>
- Chen, Z., E, J., Ma, R., Zhang, J., Yao, C., Wang, R., Zhang, Q. et al. (2022). The effect of aspartic acid on the freeze-drying survival rate of *Lactobacillus plantarum* LIP-1 and its inherent mechanism. *LWT*, 155, Article 112929. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112929>
- Heravi, R.M., Ghiasvand, M., Rezaei, E., Kargar, F. (2022). Assessing the viability of three *Lactobacillus* bacterial species protected in the cryoprotectants containing whey and maltodextrin during freeze-drying process. *Letters in Applied Microbiology*, 74(4), 505–512. <https://doi.org/10.1111/lam.13631>
- Li, X.-m., Che, L.-h., Wu, Y., Li, C., Xu, B.-c. (2024). An effective strategy for improving the freeze-drying survival rate of *Lactobacillus curvatus* and its potential protective mechanism. *Food Bioscience*, 58, Article 103794. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2024.103794>
- Haiping, L., Pei, Z., Shuhai, Z., Dengyun, Z., Herong, F., Su, Y., et al. (2019). Protective effect of polysaccharides from *Pholiota nameko* on *Lactobacillus casei* ATCC334 subjected to freeze-drying. *LWT*, 115, Article 108463. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.108463>
- Кириленко, М.А., Кузнецов, О.Ю., Дмитриева, Ж.М. (2019). Влияние криоконсервации на выживаемость комплекса аутоштаммов лактобактерий при хранении и процессах биотехнологического масштабирования. *Вестник биотехнологии и физико-химической биологии им. Ю. А. Овчинникова*, 15(2), 5–10. [Kirilenko, M.A., Kuznetsov, O. Yu., Dmitrieva, J.M. (2019). The effect of cryopreservation on the survival of a complex of lactic acid bacterial autostains during storage and biotechnological scaling processes. *Yu. A. Ovchinnikov Bulletin of Biotechnology and Physical and Chemical Biology*, 15(2), 5–10. (In Russian)]
- Archacka, M., Białas, W., Dembczyński, R., Olejnik, A., Sip, A., Szymanowska, D. et al. (2019). Method of preservation and type of protective agent strongly influence probiotic properties of *Lactococcus lactis*: A complete process of probiotic preparation manufacture and use. *Food Chemistry*, 274, 733–742. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.09.033>
- Lee, S.-B., Kim, D.-H., Park, H.-D. (2016). Effects of protectant and rehydration conditions on the survival rate and malolactic fermentation efficiency of freeze-dried *Lactobacillus plantarum* Jh287. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 100(18), 7853–7863. <https://doi.org/10.1007/s00253-016-7509-5>
- Oluwatosi, S. O., Tai, S. L., Fagan-Endres, M. A. (2021). Sucrose, maltodextrin and inulin efficacy as cryoprotectant, preservative and prebiotic-towards a freeze dried *Lactobacillus plantarum* topical probiotic. *Biotechnology Reports*, 33, Article e00696. <https://doi.org/10.1016/j.btre.2021.e00696>
- Cui, S., Hu, M., Sun, Y., Mao, B., Zhang, Q., Zhao, J. et al. (2023). Effect of trehalose and lactose treatments on the freeze-drying resistance of lactic acid bacteria in high-density culture. *Microorganisms*, 11(1), Article 48. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11010048>
- Gao, X., Kong, J., Zhu, H., Mao, B., Cui, S., Zhao, J. (2022). *Lactobacillus*, *Bifidobacterium* and *Lactococcus* response to environmental stress: Mechanisms and application of cross-protection to improve resistance against freeze-drying. *Journal of Applied Microbiology*, 132(2), 802–821. <https://doi.org/10.1111/jam.15251>
- Wang, G.-Q., Pu, J., Yu, X.-Q., Xia, Y.-J., Ai, L.-Z. (2020). Influence of freezing temperature before freeze-drying on the viability of various *Lactobacillus plantarum* strains. *Journal Dairy Sciences*, 103(4), 3066–3075. <https://doi.org/10.3168/jds.2019-17685>
- Yuste, A., Arosemena, E. L., Calvo, M. (2021). Study of the probiotic potential and evaluation of the survival rate of *Lactiplantibacillus plantarum* lyophilized as a function of cryoprotectant. *Scientific Reports*, 11(1), Article 19078. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-98723-0>
- Kavak, A.E., Zent, I., Özdemir, A., Dertli, E. (2024). Optimization of cryoprotectant formulation to enhance the viability of *Lactiplantibacillus plantarum* NBC99 isolated from human origin. *Preparative Biochemistry and Biotechnology*, 54(7), 958–966. <https://doi.org/10.1080/10826068.2024.2312450>
- Mafaldo, M., de Medeiros, V.P.B., da Costa, W.K.A., da Costa Sassi, C.F., da Costa Lima, M., de Souza, E.L. et al. (2022). Survival during long-term storage, membrane integrity, and ultrastructural aspects of *Lactobacillus acidophilus* 05 and *Lactocaseibacillus casei* 01 freeze-dried with freshwater microalgae biomass. *Food Research International*, 159, Article 111620. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.111620>
- Qu, Y., Yu, C., Gan, T., Huang, B., Huang, S., Yu, J. et al. (2023). Protective effect of cryo by-products on *Lactobacillus gasseri* H87 during freeze-drying and storage. *Drying Technology*, 41(10), 1595–1604. <https://doi.org/10.1080/07373937.2023.2167828>
- Явников, Н.В. (2022). Влияние различных криопротекторных компонентов на выживаемость пробиотических микроорганизмов после лиофильной сушки. *Международный вестник ветеринарии*, 1, 69–73. [Yavnikov, N.V. (2022). The effect of various cryoprotective components on the survival of probiotic microorganisms after freeze drying. *International Journal of Veterinary Medicine*, 1, 69–73. (In Russian)] <https://doi.org/10.52419/issn2072-2419.2022.1.69>
- Marcial-Coba, M.S., Cieplak, T., Cahú, T.B., Blennow, A., Knøchel, S., Nielsen, D.S. (2018). Viability of microencapsulated *Akkermansia muciniphila* and *Lactobacillus plantarum* during freeze-drying, storage and *in vitro* simulated upper gastrointestinal tract passage. *Food and Function*, 9(11), 5868–5879. <https://doi.org/10.1039/c8fo01331d>
- Savedboworn, W., Teawsomboonkit, K., Surichay, S., Riansa-Ngawong, W., Rittisak, S., Charoen, R. et al. (2019). Impact of protectants on the storage stability of freeze-dried probiotic *Lactobacillus plantarum*. *Food Science and Biotechnology*, 28(3), 795–805. <https://doi.org/10.1007/s10068-018-0523-x>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ	AUTHOR INFORMATION
Принадлежность к организации	Affiliation
<p>Сорокина Нинель Петровна — кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, отдел микробиологических исследований, Всероссийский научно-исследовательский институт маслоделия и сыроделия 152613, Ярославская область, Углич, ул. Красноармейский бульвар, 19 Тел.: +7-485-329-82-05 E-mail: n.sorokina@fncps.ru ORCID: http://orcid.org/0000-0002-1108-3695</p> <p>Смыков Игорь Тимофеевич — доктор технических наук, главный научный сотрудник, отдел физико-химических исследований, Всероссийский научно-исследовательский институт маслоделия и сыроделия 152613, Ярославская область, Углич, ул. Красноармейский бульвар, 19 Тел.: +7-485-329-81-21 E-mail: i.smykov@fncps.ru ORCID: http://orcid.org/0000-0002-5663-3662</p> <p>Кучеренко Ирина Валентиновна — старший научный сотрудник, отдел микробиологических исследований, Всероссийский научно-исследовательский институт маслоделия и сыроделия 152613, Ярославская область, Углич, ул. Красноармейский бульвар, 19 Тел.: +7-485-329-82-21 E-mail: i.kucherenko@fncps.ru ORCID: http://orcid.org/0000-0001-8251-992X * автор для контактов</p> <p>Кураева Елена Вячеславовна — старший научный сотрудник, лаборатория селекции микроорганизмов, Всероссийский научно-исследовательский институт маслоделия и сыроделия 152613, Ярославская область, Углич, ул. Красноармейский бульвар, 19 Тел.: +7-485-329-82-84 E-mail: e.kuraeva@fncps.ru ORCID: http://orcid.org/0000-0002-0710-3083</p> <p>Дуганова Анна Юрьевна — младший научный сотрудник, аспирант, лаборатория селекции микроорганизмов, Всероссийский научно-исследовательский институт маслоделия и сыроделия 152613, Ярославская область, Углич, ул. Красноармейский бульвар, 19 Тел.: +7-485-329-82-33 E-mail: a.duganova@fncps.ru ORCID: http://orcid.org/0000-0001-9033-5928</p>	<p>Ninel P. Sorokina, Candidate of Technical Sciences, Leading Researcher, Department of Microbiological Research, All-Russian Scientific Research Institute of Butter- and Cheesemaking 19, Krasnoarmeysky Boulevard, Uglich, 152613, Yaroslavl Region, Russia Tel.: +7-485-329-82-05 E-mail: n.sorokina@fncps.ru ORCID: http://orcid.org/0000-0001-8251-992X</p> <p>Igor' T. Smykov, Doctor of Technical Sciences, Chief Researcher, Department of Physico-chemical Research, All-Russian Scientific Research Institute of Butter- and Cheesemaking 19, Krasnoarmeysky Boulevard, Uglich, 152613, Yaroslavl Region, Russia Tel.: +7-485-329-81-21 E-mail: i.smykov@fncps.ru ORCID: http://orcid.org/0000-0002-5663-3662</p> <p>Irina V. Kucherenko, Senior Researcher, Department of Microbiological Research, All-Russian Scientific Research Institute of Butter- and Cheesemaking 19, Krasnoarmeysky Boulevard, Uglich, 152613, Yaroslavl Region, Russia Tel.: +7-485-329-82-21 E-mail: i.kucherenko@fncps.ru ORCID: http://orcid.org/0000-0001-8251-992X * corresponding author</p> <p>Elena V. Kuraeva, Senior Researcher, Microorganism Selection Laboratory, All-Russian Scientific Research Institute of Butter- and Cheesemaking 19, Krasnoarmeysky Boulevard, Uglich, 152613, Yaroslavl Region, Russia Tel.: +7-485-329-82-84 E-mail: e.kuraeva@fncps.ru ORCID: http://orcid.org/0000-0002-0710-3083</p> <p>Anna Yu. Duganova, Junior Researcher, Graduate Student, Microorganism Selection Laboratory, All-Russian Scientific Research Institute of Butter- and Cheesemaking 19, Krasnoarmeysky Boulevard, Uglich, 152613, Yaroslavl Region, Russia Tel.: +7-485-329-82-33 E-mail: a.duganova@fncps.ru ORCID: http://orcid.org/0000-0001-9033-5928</p>
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/10.21323/2618-9771-2025-8-4-498-505>

Поступила 24.09.2025

Поступила после рецензирования 11.11.2025

Принята в печать 14.11.2025

© Путилов В. Э., Непомнящий А. П., Причепа А. О., Белова Д. Д., Шарова Н. Ю., 2025

<https://www.fsjour.com/jour>

Научная статья

Открытый доступ

АНТИМИКРОБНЫЕ ПЛЕНКИ НА ОСНОВЕ КАРТОФЕЛЬНОГО КРАХМАЛА С ДОБАВЛЕНИЕМ МОЛОЧНОЙ КИСЛОТЫ

Путилов В. Э.^{1,2*}, Непомнящий А. П.¹, Причепа А. О.¹, Белова Д. Д.¹, Шарова Н. Ю.^{1,2}¹Всероссийский научно-исследовательский институт пищевых добавок Санкт-Петербург, Россия²Национальный исследовательский университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: АННОТАЦИЯ

биоразлагаемая пленка, картофельный крахмал, молочная кислота, антимикробная активность, кислородный барьер, паропроницаемость

Цель работы — получение и оценка свойств биоразлагаемых антимикробных пленок на основе картофельного крахмала, глицерина и молочной кислоты как функциональных добавок для пищевой упаковки. Пленки получали методом литья из раствора: 2% (масс./об.) дисперсию крахмала желатинизировали ($70 \pm 1^\circ\text{C}$, 30 мин), вводили глицерин (0,4%) и молочную кислоту (1,0%), дегазировали, разливали и сушили (60°C , 24 ч), затем кондиционировали (48 ч, $23 \pm 2^\circ\text{C}$). Измеряли толщину, механические и барьерные свойства, а также антимикробную активность (диск-диффузионный метод на питательной среде LB, тест-культуры *Escherichia coli* и *Bacillus subtilis*; положительный контроль — тетрациклин 30 мкг, отрицательный контроль — стерильный диск фильтровальной бумаги; сравнение со свободной молочной кислотой). Полученные пленки были оптически однородными, без макродефектов, толщиной 0,09–0,11 мм. Пленки продемонстрировали высокую прочность при растяжении $74,8 \pm 7,4$ МПа и относительном удлинении $23,7 \pm 4,6\%$ ($n = 10$). Скорость переноса водяного пара составила $1290,7 \pm 60,8 \text{ г} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}$, коэффициент паропроницаемости — $2,05 \times 10^{-4} \text{ г} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1} \cdot \text{Па}^{-1}$ (относительная влажность воздуха 90%); при этом в сухих условиях (относительная влажность около 0%) фиксировалась крайне низкая газопроницаемость по O_2/CO_2 (ниже порога расчета стационарной проницаемости). При анализе антимикробной активности диско-диффузионным методом пленки формировали зоны ингибирования роста (*E. coli*: $10,67 \pm 1,53$ мм; *B. subtilis*: $10,67 \pm 0,58$ мм), сопоставимые со свободной молочной кислотой (соответственно $9,67 \pm 0,58$ и $12,00 \pm 1,00$ мм). Совокупность результатов подтверждает, что крахмальные пленки с молочной кислотой обладают высокими барьерными свойствами (в сухой фазе) и антимикробной активностью (при контакте с влажной поверхностью), что делает их перспективными для использования в качестве активной упаковки охлажденных мясных и молочных продуктов и как функциональный слой в многослойных пленках.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Исследование подготовлено в рамках выполнения государственного задания FGUS-2022-0003 ФГБНУ «ФНЦ пищевых систем им. В. М. Горбатова» РАН.

Received 24.09.2025

Accepted in revised 11.11.2025

Accepted for publication 14.11.2025

© Putilov V. E., Nepomnyashiy A. P., Prichepa A. O., Belova D. D., Sharova N. Yu., 2025

Available online at <https://www.fsjour.com/jour>

Original scientific article

Open access

ANTIMICROBIAL POTATO STARCH — BASED FILMS INCORPORATING LACTIC ACID

Vladislav E. Putilov^{1,2*}, Anatoliy P. Nepomnyashiy¹, Artem O. Prichepa¹, Daria D. Belova¹, Natalya Yu. Sharova^{1,2}¹All-Russian Research Institute of Food Additives, Saint Petersburg, Russia²ITMO University, Saint Petersburg, Russia

KEYWORDS:

biodegradable film, potato starch, lactic acid, antimicrobial activity, oxygen barrier, water vapor transmission rate

ABSTRACT

The aim of the work was to produce and assess properties of biodegradable antimicrobial films based on potato starch, glycerin and lactic acid as functional additives for food packaging. Films were produced by the casting method from the solution: 2% (w/v) starch dispersion was gelatinized ($70 \pm 1^\circ\text{C}$, 30 min), glycerin (0.4%) and lactic acid (1.0%) were added, the mixture was degassed, poured and dried (60°C , 24 h), and then conditioned (48 h, $23 \pm 2^\circ\text{C}$). Thickness, mechanical and barrier properties as well as the antimicrobial activity were measured. The antimicrobial activity was determined by the disc diffusion method on the LB nutrient medium with *Escherichia coli* and *Bacillus subtilis* as test cultures, 30 μg tetracycline as a positive control and sterile filter paper disc as a negative control (comparison with free lactic acid). The films obtained were optically homogeneous, without macro defects, and had a thickness of 0.09–0.11 mm. Films demonstrated high tensile strength of 74.8 ± 7.4 MPa and elongation of $23.7 \pm 4.6\%$ ($n = 10$). Water vapor transmission rate was $1290.7 \pm 60.8 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}$, vapor permeability coefficient was $2.05 \times 10^{-4} \text{ g} \cdot \text{m} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$ (90% relative humidity of air). With that, in dry conditions (relative humidity of about 0%), quite low gas permeability in terms of O_2/CO_2 was recorded (lower than the threshold of the calculation of the stationary permeability). Analysis of the antimicrobial activity by the disc diffusion method showed that the films formed inhibition zones (*E. coli*: 10.67 ± 1.53 mm; *B. subtilis*: 10.67 ± 0.58 mm) that were comparable with free lactic acid (9.67 ± 0.58 and 12.00 ± 1.00 mm, respectively). The combined results confirm that starch films with lactic acid have high barrier properties (in the dry phase) and antimicrobial activity (upon contact with the moist surface), which make them promising for using as active packaging for chilled meat and dairy products and as a functional layer in multi-layer films.

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.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Путилов, В. Э., Непомнящий, А. П., Причепа, А. О., Белова, Д. Д., Шарова, Н. Ю. (2025). Антимикробные пленки на основе картофельного крахмала с добавлением молочной кислоты. *Пищевые системы*, 8(4), 498–505. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-4-498-505>

FOR CITATION: Putilov, V. E., Nepomnyashchii, A. P., Prichepa, A. O., Belova, D. D., Sharova, N. Yu. (2025). Antimicrobial potato starch — based films incorporating lactic acid. *Food Systems*, 8(4), 498–505. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-4-498-505>

1. Введение

Современное использование синтетических пластиковых материалов порождает серьезные экологические и экономические проблемы. Большинство традиционных пластиковых пленок и упаковок разлагаются очень медленно — на их разложение требуются десятки и сотни лет; загрязнение почв и водных систем, негативное влияние на флору, фауну и на здоровье человека [1–3]. Пластик, особенно одноразовый, часто оказывается в окружающей среде — на свалках, в почве, в водоемах; при этом он практически не разлагается, что ведет к его долговременному накоплению [4,5]. Фрагментация пластиковых материалов приводит к образованию микропластика, который способен сорбировать и переносить гидрофобные органические загрязнители и иные токсиканты, а также вовлекаться в пищевые цепи [6,7]. Производство, транспортировка и утилизация (в том числе сжигание) пластика связаны с эмиссией CO₂ и других парниковых газов, а также с использованием невозобновляемых ресурсов; корректно организованная биodeградация и замещение полимеров более экологичными по жизненному циклу альтернативами способны снижать углеродный след [8,9].

Загрязнение окружающей среды пластиком вызывает значительные социально-экономические потери. По расчетам экспертов, загрязнение пластиком приводит к потерям, сопоставимым с 1–5 % от общей ценности морских экосистем, что оценивается в триллионы долларов США ежегодно [10]. Игнорировать ущерб экосистемам, здоровью и утрату рекреационных возможностей дороже, чем инвестировать в устойчивые альтернативы: экономические модели прогнозируют, что при сохранении текущих трендов потребления суммарный ущерб достигнет десятки триллионов долларов в ближайшие десятилетия [11]. На этом фоне отмечается устойчивая траектория роста рынка биоразлагаемых полимеров [12].

Биоразлагаемые пленки становятся все более важной альтернативой традиционным полимерным материалам благодаря сочетанию экологических, технологических и потребительских факторов. Биоразлагаемые полимеры включают как природные, так и синтетические классы; их общая черта — способность к разрушению под действием микроорганизмов или иных биотических/абиотических факторов [13]. К природным биополимерам относятся крахмал, целлюлоза, белки, хитин/хитозан и др.; они происходят из возобновляемых ресурсов и технологически доступны [14,15]. В области синтетических биоразлагаемых полимеров (полимолочная кислота, полигидроксикапроаты и др.) активно создаются материалы, сочетающие механическую прочность, термостабильность и способность к биоразложению [16].

Биоразлагаемые пленки на основе крахмала являются перспективными: сырье возобновляемо, стоимость ниже, чем у многих синтетических биополимеров, а рецептура легко модифицируется пластификаторами и функциональными добавками [17]. Природный источник крахмала существенно влияет на морфологию гранул, соотношение амилозы и амилопектина и, как следствие, на свойства пленок [18]. Так, крахмал картофеля характеризуется более крупными гранулами и большей склонностью к поглощению воды, что может повышать гибкость, но усиливает чувствительность к влаге; сравнительный анализ пленок из кукурузного и картофельного крахмала (с оптимизацией глицерина и уксусной кислоты) показал лучшую гибкость, более высокую термостабильность и структурную целостность систем на основе картофельного крахмала [19].

Чтобы пленки на основе природных полимеров были применимы, необходимо минимизировать их естественные ограничения: хрупкость, низкую растяжимость, высокую чувствительность к влаге и ограниченные барьерные свойства. Для этого используют пластификаторы — вещества, вводимые в матрицу для изменения физико-механических и барьерных характеристик [20,21]. Глицерин — наиболее распространенный пластификатор для крахмальных пленок: он снижает хрупкость и увеличивает относительное удлинение при разрыве, но при избытке уменьшает прочность. Например, для крахмала *Maranta arundinacea* увеличение доли глицерина от 15 % до 45 % (от массы крахмала) снижало прочность от 9,34 до 1,95 МПа при росте относительного удлинения при разрыве с 2,41 до 57,33 % [22]; для систем на основе кукурузного крахмала при содержании 15 % крахмала и 30 % глицерина исследователи получали оптимальный баланс прочности и гибкости, тогда как дальнейшая пластификация приводила к снижению прочности [23].

Использование биоразлагаемых материалов в качестве упаковки в пищевой промышленности представляет особый интерес при наличии антимикробной активности, так как на фоне ее отсутствия может ускоряться порча и снижаться качество продуктов [24]. Для решения этой задачи в крахмальные пленки вводят антимикробные

агенты (органические кислоты, эфирные масла, соли металлов, поликатионы и др.) [25]. В обзорной статье по биоразлагаемым пленкам на основе крахмала, хитозана, альгината и их комбинаций показано, что растительные экстракты, пластификаторы, сшивающие агенты и нанонаполнители способны одновременно улучшать механические и гидрофильные характеристики и обеспечивать антимикробный эффект [26].

Эфирные масла широко изучены как антимикробные агенты в биополимерных пленках, но их летучесть, химическая нестабильность и выраженные органолептические эффекты осложняют воспроизводимость активности и промышленную применимость; часто требуется инкапсуляция [27,28]. На этом фоне органические кислоты предпочтительны как более стабильные и совместимые с пищевыми матрицами антимикробные агенты.

Молочная кислота — органическая кислота с доказанной антимикробной активностью, которая также может модифицировать физико-механические свойства крахмальных пленок [29]. В пленках на основе поливинилового спирта включение молочной кислоты обеспечивало подавление роста *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus*, *Pseudomonas aeruginosa* и *Staphylococcus epidermidis* при сохранении барьерных характеристик [30]. Антимикробное действие молочной кислоты связано преимущественно с проникновением недиссоциированной формы в клетку и с последующим снижением внутриклеточного pH, что энергетически истощает клетку за счет работы протонных насосов [31]. Во многих случаях добавление молочной кислоты повышает гибкость пленок (частичный пластифицирующий эффект) при возможном снижении прочности на разрыв; также описано влияние на паро- и газоперенос и термическую стабильность [29,30].

Практическая значимость биоразлагаемых пленок с антимикробной активностью наиболее очевидна в сфере пищевой упаковки, где требуется не только экологичность, но и защита от микробной порчи. Пленки на основе картофельного крахмала с гвоздичным маслом снижали микробную обсемененность и замедляли окисление жиров при упаковке охлажденной свинины [32]. Картофельные крахмальные пленки с растительными экстрактами обеспечивали микробиологическую стабильность куриного филе в течение более чем недели хранения [33]. Для молочных продуктов съедобные покрытия на основе крахмала и хитозана с антимикробными экстрактами растений замедляли рост плесеней на поверхности сыров и улучшали окислительную стабильность [34].

Современные подходы к активной биоразлагаемой упаковке ориентированы на контролируемое высвобождение активных веществ — прежде всего диффузионно управляемое через матрицу или барьерный слой, причем накопление влаги внутри упаковки служит основным фактором, инициирующим запуск переноса и активации [35,36]. Для многослойных структур показано, что профиль высвобождения задается типом, толщиной и полярностью слоев; размещение активного слоя со стороны продукта позволяет локализовать эффект и продлить время действия при минимальных потерях летучих и низкомолекулярных добавок [35].

Несмотря на значительный прогресс в области съедобных и биоразлагаемых пленочных материалов, остаются нерешенными задачи обеспечения высокого кислородного барьера в сухой фазе, контролируемого переноса влаги и воспроизводимой антимикробной активности без использования летучих, нестабильных добавок [37–39]. Для крахмальных систем, особенно на основе картофельного крахмала с выраженной гидрофильностью, критично, чтобы антимикробное действие реализовывалось преимущественно на границе контакта упаковочного материала и продукта и запускалось контактом с влагой, не разрушая при этом барьер по O₂ [40]. Из этого следует, что молочная кислота — технологически привлекательная функциональная добавка: она совместима с пищевыми матрицами, обладает антимикробной активностью и способна управляемо высвобождаться в увлажненной среде [41].

Целью настоящей работы является получение и исследование свойств биоразлагаемых антимикробных пленок на основе картофельного крахмала с использованием глицерина и молочной кислоты в качестве функциональных добавок. В рамках исследования ставилась задача оценить физико-механические характеристики, барьерные свойства и антимикробную активность полученных материалов.

2. Объекты и методы

Картофельный крахмал (Sigma-Aldrich, США), глицерин (≥ 99,5 %), молочная кислота (водный раствор 80 %, Henan Jindan Lactic Acid Technology, Китай) использовались без дополнительной очистки. Для микробиологических испытаний применяли питательную среду

LB (Lysogeny broth) агаризованную (дрожжевой экстракт 5 г/л, пептон 10 г/л, NaCl 10 г/л, микробиологический агар 15 г/л), стерильный физиологический раствор, стандартные антибиотические диски тетрациклина (30 мкг, «Научно-исследовательский центр фармакотерапии») для положительного контроля антимикробной активности. Тест-штаммы *Escherichia coli* M-17-02 и *Bacillus subtilis* subsp. *subtilis* были получены из «Всероссийской коллекции промышленных микроорганизмов» (регистрационные номера в коллекции — В-8208 и В-9865 соответственно).

Пленки готовили методом литья из раствора [42,43], который является стандартным для крахмальных матриц с пластификаторами: суспензию крахмала в количестве 2 % (масс./об.) в воде нагревали до полной желатинизации при температуре $70 \pm 1^\circ\text{C}$ в течение 30 минут с перемешиванием, после чего вводили глицерин 20 % от массы крахмала и молочную кислоту 50 % от массы крахмала, дегазировали с помощью ультразвуковой ванны Sonorex Digital 10 P (BANDELIN, Германия). После введения молочной кислоты pH раствора измеряли с помощью калиброванного pH-метра HI2030-02 edge (Hanna Instruments, Италия) и фиксировали в пределах pH 3,2–3,8. Поддержание узкого диапазона pH необходимо для воспроизводимости реологии раствора и степени протекания кислот-индуцированных модификаций крахмальной матрицы на стадии желатинизации. Раствор разливали на ровную PTFE-подложку (200×150 мм) из расчета $0,7 \text{ мл/см}^2$ (что соответствует 210 мл на пластину площадью 300 см^2). Такой удельный объем соответствует распространенным режимам литья для крахмальных систем и обеспечивает итоговую толщину пленки порядка 0,10 мм. Пленки высушивали до постоянной массы в термостате IN30 (Memmert, Германия) при температуре $60 \pm 1^\circ\text{C}$ и $50 \pm 5\%$ относительной влажности воздуха в течение 24 часов. В настоящем исследовании было изготовлено 13 пленок S1–S13 одного состава (крахмал — 2 %, глицерин — 0,4 %, молочная кислота — 1 %). Пленки S1–S5 были использованы для определения толщины, пленки S6–S7 — для установления прочности при растяжении и относительного удлинения при разрыве. Образцы S8–S10 применялись для определения барьерных свойств, а пленки S11–S13 были использованы для установления антимикробной активности. Перед испытаниями пленки выдерживали не менее 48 ч при температуре $23 \pm 2^\circ\text{C}$ и $50 \pm 5\%$ относительной влажности воздуха.

Толщину пленок определяли при помощи электронного микрометра 101-01-2-П (Asimeto, Китай). За результат принимали среднеарифметическое значение десяти параллельных измерений.

Прочность при растяжении и относительное удлинение при разрыве пленки измеряли на универсальной испытательной машине МИМ. 1–1 (ООО «ГОСТ», Россия). Для проведения исследований из пленок вырезали образцы прямоугольной формы длиной 150 ± 1 мм и шириной $15,0 \pm 0,1$ мм. Подготовленные образцы закрепляли при помощи нижнего и верхнего зажимов, расстояние между которыми составляло 50 мм, перемещение подвижной траверсы осуществлялось при скорости 200 ± 20 мм/мин. За результат принимали среднее значение десяти параллельных испытаний, вычисленное с точностью до десятичного знака [44].

Газопроницаемость, скорость переноса водяного пара (СПВП, $\text{г} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$) пленки определяли гравиметрическим методом на приборе W3/031 (Labthink, Китай). Исследуемый образец диаметром 74 мм размещали между двумя резиновыми уплотнительными кольцами испытательной чаши, наполненной дистиллированной водой, и помещали в испытательную камеру. Испытания проводили при температуре $38 \pm 1^\circ\text{C}$ и относительной влажности $90 \pm 2\%$. СПВП рассчитывали путем вычисления разницы массы испытательных чаш с течением времени. За результат принимали среднее значение трех параллельных испытаний [45].

Газопроницаемость пленки определяли манометрическим методом на приборе VAC-V1 (Labthink, Китай). Прибор состоит из двух камер — верхней (высокого давления) и нижней (низкого давления), между которыми помещается исследуемый образец. Перед началом испытания давление в нижней камере равно нулю. При испытании в верхней камере путем подачи газа (кислорода, углекислого газа) создается постоянное входное давление. Газ проходит через образец и поступает в нижнюю камеру, заполняя ее. При этом считывается скорость проникновения газа через образец. Исследуемый образец пленки диаметром 97 мм размещали между двумя камерами. Скорость газопроницаемости определяли путем измерения объема газов (кислород, углекислый газ), проходящих через образец пленки в единицу времени при единичной разнице парциальных давлений. Испытания проводились при температуре $23 \pm 1^\circ\text{C}$ [46].

Антимикробные свойства пленок оценивали методом диффузии в агар на питательной среде LB [25,47]. Компоненты LB-среды раство-

ряли при перемешивании, pH доводили до $7,0 \pm 0,2$ (1 M NaOH/HCl), затем стерилизовали автоклавированием на автоклаве SJ-FW (SJ Clave, Южная Корея) при температуре 121°C в течение 15 мин. Питательную среду разливали по 20–25 мл на чашку диаметром 90 мм (толщина слоя около 4 мм). Из пленок вырезали круглые диски диаметром 6 мм и асептически переносили на поверхность питательной среды с тест-организмами в чашках Петри. Бактериальную суспензию готовили в стерильном физиологическом растворе, доводя оптическую плотность при длине волны 600 нм до $0,10 \pm 0,01$. Затем эту бактериальную суспензию переносили на агаризованную питательную среду в объеме 100 мкл и распределяли стерильным шпателем Дригальского. Положительный контроль — стандартный диск тетрациклина (30 мкг); отрицательный контроль — вырезанный из фильтровальной бумаги диск диаметром 6 мм, стерилизованный ультрафиолетом. Дополнительно оценивали диаметр зон ингибирования роста у 10 мкл 10 % молочной кислоты, нанесенных на диск фильтровальной бумаги диаметром 6 мм. Чашки Петри с культурой инкубировали в течение 24 часов в случае *E. coli* при температуре 37°C , а в случае *B. subtilis* — при 28°C . Диаметр зон ингибирования измеряли штангенциркулем марки ШЦ-I-150-0,1 (GRIFF, Россия). Испытание антимикробной активности проводили в трех независимых повторях.

Все микробиологические операции осуществлялись в асептических условиях с использованием ламинарного бокса II класса биологической безопасности типа SC2–6S1 (ESCO Streamline, Сингапур). Работа со штаммами проводилась по правилам 2-го уровня биологической безопасности.

Электронный микрометр 101-01-2-П (Asimeto, Китай) калибровали по мерам 0,100 и 0,500 мм; расширенная неопределенность измерения толщины не превышала $\pm 2\%$. Аналитические весы GR-200 (AND, Япония) (погрешность = 0,1 мг) проверяли по гилям класса F1 перед каждой серией. Для W3/031 проводили контрольную серию на эталонной пленке из полиэтилентерефалата (поставляется производителем прибора W3/031, Labthink) толщиной 50 ± 2 мкм. Паспортное значение СПВП при $38 \pm 1^\circ\text{C}$ и $90 \pm 2\%$ относительной влажности составляет $0,80 \pm 0,05 \text{ г} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$. Полученное в работе значение — $0,82 \pm 0,03 \text{ г} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$ ($n = 3$); относительное расхождение + 2,5 %, что не превышает допустимого отклонения $\pm 5\%$. Для VAC-V1 выполняли тест герметичности (падение давления < 0,1 кПа/10 мин). Все данные представлены как среднее значение \pm стандартное отклонение. Для сравнения групп использовали однофакторный дисперсионный анализ (ANOVA), различия считались значимыми при $p < 0,05$.

3. Результаты и обсуждение

Полученные пленки после литья и сушки представляли собой непрерывные покрытия без видимых дефектов (трещин, пузырей, включений), что характерно для крахмальных матриц при полной желатинизации и наличии низкомолекулярного пластификатора. Подобная ровная структура согласуется с данными, полученными для крахмальных пленок, где при использовании глицерина формируются компактные, непористые поверхности, в отличие от непластифицированных образцов, склонных к дефектам [48,49]. Сводные данные по толщине, pH пленочного раствора, физико-механическим (прочность при растяжении, относительное удлинение при разрыве) и барьерным характеристикам (СПВП, газопроницаемость) представлены в Таблице 1.

Толщина пленок определялась в 10 точках на каждом образце; равномерность толщины важна, поскольку она напрямую влияет на интерпретацию механических и барьерных свойств. Для полимерных материалов на основе крахмала это подчеркнуто в литературе: неоднородность толщины значительно влияла бы на характеристики, что помешало бы оценить влияние состава пленки [50]. Толщина пленок образовала две статистические группы: образцы S2, S4 и S5 принадлежат одной статической группе, тогда как S1 и S3 принадлежат другой. При этом абсолютные различия невелики, укладываются в технологически ожидаемый разброс для литья пленок и, по-видимому, связаны с несущественными колебаниями распределения раствора по подложке и локальной кинетики испарения.

Равномерность толщины пленок критична для сопоставления как СПВП, так и предела прочности. При прочих равных СПВП масштабируется обратно пропорционально толщине, тогда как для прочности на разрыв влияние толщины выражается косвенно — через геометрию образца и локальные дефекты.

С точки зрения строения матрицы ожидаемым является воздействие глицерина как пластификатора: он конкурирует за водородные связи с гидроксильными группами крахмала, снижает плотность межмолекулярных контактов и температуру стеклования, увеличивая подвижность сегментов макромолекул. На уровне морфологии

Таблица 1. Толщина, pH раствора, физико-механические и барьерные свойства образцов S1-S10
Table 1. Thickness, pH of the solution, physico-mechanical and barrier properties of the samples S1-S10

Номер образца	Толщина, мм	pH	Прочность при растяжении, МПа	Относительное удлинение, %	СПВП, г/м ² ·сут	Газопроницаемость пленки, см ³ /м ² ·сут·бар
S1	0,098±0,008 ^b	3,48±0,07 ^c	—	—	—	—
S2	0,114±0,017 ^a	3,50±0,08 ^c	—	—	—	—
S3	0,094±0,011 ^b	3,49±0,08 ^c	—	—	—	—
S4	0,107±0,012 ^a	3,52±0,09 ^c	—	—	—	—
S5	0,112±0,011 ^a	3,51±0,07 ^c	—	—	—	—
S6	—	3,47±0,08 ^c	74,8±7,4 ^d	23,7±4,6 ^e	—	—
S7	—	3,53±0,08 ^c	69,6±6,6 ^d	26,3±4,8 ^e	—	—
S8	—	3,50±0,09 ^c	—	—	1290,7±60,8 ^f	н/о
S9	—	3,52±0,09 ^c	—	—	1440,0±40,8 ^f	н/о
S10	—	3,49±0,08 ^c	—	—	1440,4±80,2 ^f	н/о

Примечание: данные приведены как среднее значение ± стандартное отклонение. Для толщины использовано $n = 10$ повторов; для pH — $n = 3$; для прочности при растяжении, относительного удлинения, СПВП и газопроницаемости — $n = 3$. В пределах каждого столбца разные надстрочные латинские буквы обозначают статистически значимые различия между средними.

это выражается в более однородной структуре без микротрещин и разрывов фаз, что неоднократно фиксировалось для различных источников крахмала [48,51].

Включение молочной кислоты также способно модифицировать структуру крахмальной матрицы на стадии желатинизации и последующего формирования пленки. Показано, что органические кислоты снижают температуру и эн탈пию желатинизации, уменьшают внутреннюю вязкость и жесткость гелей, а на уровне частиц могут вызывать дефекты гранул и частичную деструкцию в аморфных областях; при этом влияние молочной кислоты выражено сильнее, чем уксусной [52].

Совокупность морфологических признаков наших образцов — непрерывность, отсутствие макродефектов и однородность толщины — соответствует типичным свойствам пленок, приготовленных из картофельного крахмала, глицерина и молочной кислоты [29,48,50].

Физико-механические показатели пленок (прочность при растяжении и относительное удлинение при разрыве (Таблица 1)) находились на уровне, характерном для крахмальных композиций с глицерином. Между исследованными образцами S6 и S7 не выявлено статистически значимых различий по прочности и удлинению. Сочетание высокой прочности при умеренной пластичности указывает на плотную полимерную матрицу и в то же время на успешную пластификацию, позволяющую избежать хрупкого разрушения. В данном составе пленок массовое соотношение глицерина к крахмалу составляет около 20 %, а молочной кислоты к крахмалу — около 50 %; оба компонента способны конкурировать за водородные связи с гидроксильными группами крахмала, снижая плотность взаимодействий между цепями полимера и температуру стеклования, что повышает подвижность пленки и относительное удлинение при разрыве [29,48,49]. При этом полученная прочность остается высокой — вероятно, за счет плотной упаковки крахмальной матрицы при используемых режимах желатинизации и сушки, а также более упорядоченной структуры после формирования пленки. Это согласуется с наблюдаемой морфологией и литературными данными о влиянии условий литья и кондиционирования на механические показатели крахмальных пленок [42,43].

В других матрицах на основе крахмала физико-механические параметры соизмеримы. Так, например, в [22] исследователи достигли прочности 9,3 МПа и относительного удлинения при разрыве 57 % при использовании различных соотношений крахмала и глицерина. В случае кукурузного крахмала исследователи получали пленки с прочностью при растяжении 1,28, 0,86 и 0,54 МПа при относительном удлинении при разрыве от 12 % до 17 % [23]. Физико-механические параметры пленок в настоящем исследовании отличаются большей прочностью в сравнении с исследованиями [22,23]. Это указывает на более плотную сеть полимерных цепей при умеренной доле глицерина и одновременном присутствии молочной кислоты. Последняя может проявлять частичный пластифицирующий эффект [52], чем объясняется относительно высокое значение удлинения при разрыве. Важно подчеркнуть, что сопоставление абсолютных значений физико-механических параметров между исследованиями ограничено различиями в источнике крахмала (соотношение амилозы/амилопектина), во влажности образцов, в толщине и режимах кондиционирования, а также в параметрах испытаний (скорость растяжения, база захватов) [42–44]. Поддержание pH 3,4–3,6 после ввода молочной кислоты обеспечивало воспроизводи-

мую реологию и формирование однородной матрицы без макродефектов. Это проявлялось в стабильных значениях предела прочности и относительного удлинения при разрыве между партиями. Для антимикробных тестов узкий диапазон pH важен также потому, что он задает начальную активность недиссоциированной формы кислоты и, следовательно, раннюю кинетику формирования ингибирующей микросреды при контакте с влагой.

Полученные в результате гравиметрических испытаний показатели СПВП, представленные в Таблице 1, не имеют статистически значимых различий между образцами S8–S10, что говорит о сопоставимости и достоверности результатов. Для гидрофильных крахмальных пленок такие значения типичны: высокая сорбция влаги и пластизирующее действие воды в сочетании с полиолами увеличивают подвижность сегментов полимерных цепей, что приводит к росту паропроницаемости по мере увеличения влажности и доли пластификатора. Этот тренд широко описан в литературе для крахмальных систем: проницаемость по водяному пару возрастает с температурой, влажностью и содержанием пластификатора (глицерина), а также зависит от толщины и микроструктуры пленки [51,53]. Поэтому сравнение абсолютных величин возможно лишь при учете условий теста.

Испытания газопроницаемости по кислороду и диоксиду углерода, выполненные манометрическим методом на VAC-V1, показали крайне низкие скорости переноса: давление в нижней камере в течение длительного времени не достигало порогового уровня, необходимого для расчета стационарной проницаемости. Такой исход согласуется с тем, что при низкой влажности крахмальные пленки обычно обладают очень хорошим кислородным барьером благодаря плотной водородно-связанной сети и сравнительно высокому уровню упорядоченности, тогда как водяной пар проходит значительно легче из-за гидрофильности матрицы [46,51,54,55].

Полученный профиль барьерных свойств объясняется тем, что гидрофильная полисахаридная матрица и полиольная пластификация увеличивают паропроницаемость, особенно при высокой относительной влажности, но при этом обеспечивают низкую проницаемость для неполярных газов в сухих условиях [56,57]. Практически показатели барьерных свойств полученных пленок указывают на то, что рассматриваемые пленки целесообразно использовать там, где критична кислородная защита (мясные и молочные продукты, склонные к окислительной порче) при контролируемой влажности или в составе многослойных решений (например, с гидрофобным наружным слоем). Поскольку в увлажненной среде полиольная пластификация ускоряет диффузию низкомолекулярных компонентов [51,57], можно ожидать более интенсивное высвобождение молочной кислоты и рост зон ингибирования, что подтверждается ниже количественными данными.

На фотографиях чашек Петри (Рисунок 1) представлены зоны ингибирования роста *E. coli* и *B. subtilis* при диск-диффузионном методе на LB-агаре. Для обоих микроорганизмов вокруг тетрациклина наблюдаются отчетливые зоны задержки роста; диск, вырезанный из полученной пленки (образцов S11-S13), и свободная молочная кислота на фильтровальной бумаге также формируют подавляющие ореолы, тогда как отрицательный контроль зон ингибирования не дает.

Количественные результаты (Таблица 2) демонстрируют сопоставимые уровни антимикробной активности пленки и свободной молочной кислоты при ожидаемо большей зоне у тетрациклина.

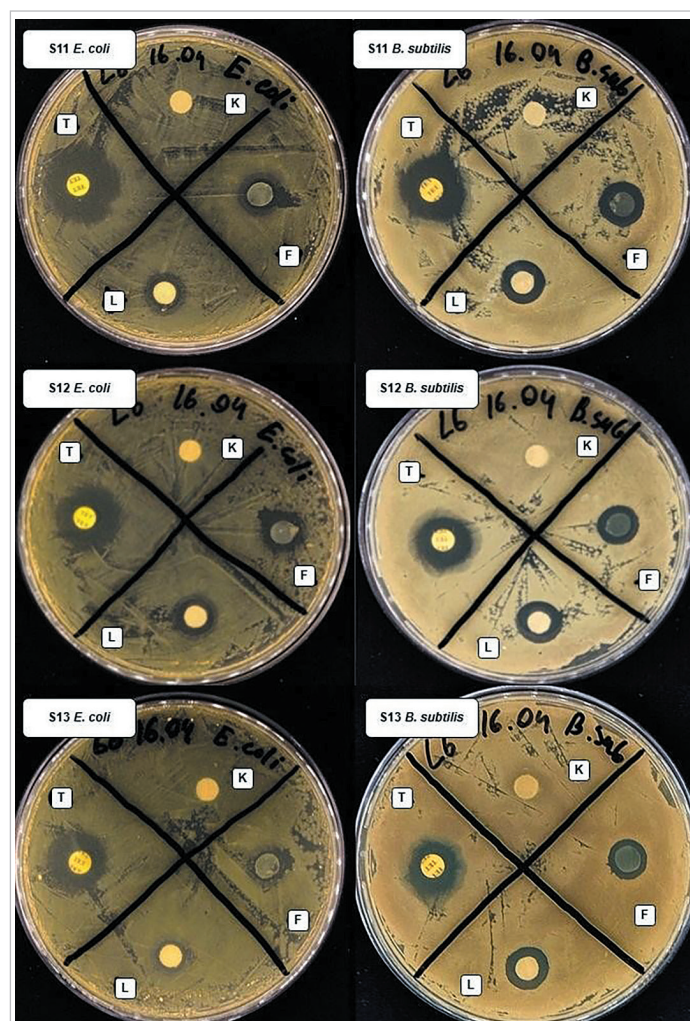


Рисунок 1. Зоны ингибирования роста *E. coli* и *B. subtilis* при диск-диффузионном методе определения антимикробной активности образцов пленок S11–S13.

T — тетрациклин (30 мкг); L — молочная кислота (10%, 10 мкл) на диске фильтровальной бумаги; K — контроль (диск фильтровальной бумаги); F — полученная пленка. Период инкубации 24 часа

Figure 1. Inhibition zones of the *E. coli* and *B. subtilis* growth determined by the disc diffusion method for assessing the antimicrobial activity of the film samples S11–S13. T — tetracycline (30 µg); L — lactic acid (10%, 10 µl) on the filter paper disc; K — control (filter paper disc); F — produced film. Incubation period — 24 hours

Отрицательный контроль зон ингибирования не образовывал. Согласно ANOVA, для *E. coli* и *B. subtilis* различия антимикробной активности полученной пленки и свободной молочной кислоты статистически не значимы, тогда как тетрациклин формировал достоверно большие зоны. Вероятно, механизм ингибирования молочной кислотой связан с природой слабых органических кислот: недиссоциированная форма проходит через мембрану, снижает внутриклеточный pH и нарушает метаболизм; при этом для грамотрицательных наблюдается дополнительный эффект пермеабилзации внешней мембраны, а у грамположительных — прямая кислотная стресс-реакция, что в совокупности приводит к подавлению роста обеих групп микроорганизмов [31].

То, что пленка демонстрирует зоны, сопоставимые со свободной молочной кислотой, указывает на эффективное высвобождение кислоты из матрицы и на поддержание локально кислой среды на границе пленки и агаризованной питательной среды. Аналогичные результаты отмечались и для других полимерных систем с молочной кислотой. Включение молочной кислоты в матрицу приводило к отчетливым зонам подавления *E. coli* и *Staphylococcus aureus*, что подтверждает сохранение активности молочной кислоты в составе пленки [30]. С практической точки зрения, это означает, что при поверхностной контаминации, характерной для охлажденных мяса, птицы или сыров, пленка способна обеспечить быстрый старт подавления микрофлоры без применения внешних консервантов [30,34].

Таблица 2. Диаметры зон ингибирования роста *E. coli* и *B. subtilis* на чашках при диск-диффузионном методе определения антимикробной активности образцов пленок S11–S13

Table 2. Diameters of the inhibition zones of the *E. coli* and *B. subtilis* growth on Petri dishes determined by the disc diffusion method for assessing the antimicrobial activity of the film samples S11–S13

Номер образца	Диаметр зоны ингибирования, мм		
	Молочная кислота	Полученная пленка	Тетрациклин
<i>Escherichia coli</i>			
S11	9,6±0,6 ^a	9,9±0,7 ^a	16,7±1,2 ^b
S12	9,8±0,7 ^a	10,4±0,8 ^a	16,2±1,0 ^b
S13	9,5±0,8 ^a	10,7±0,9 ^a	17,1±1,3 ^b
<i>Bacillus Subtilis</i>			
S11	12,1±0,8 ^a	11,4±0,7 ^a	15,6±0,9 ^b
S12	11,8±0,9 ^a	11,0±0,6 ^a	15,2±1,1 ^b
S13	12,3±0,7 ^a	10,9±0,8 ^a	15,1±1,0 ^b

Примечание: данные представлены как среднее значение±стандартное отклонение (n = 3). В пределах каждого блока (для каждой бактерии) одинаковые надстрочные буквы обозначают отсутствие статистически значимых различий (ANOVA; α = 0,05), разные — различия значимы.

В контексте физико-механических и барьерных свойств пленки наблюдаемая антимикробная активность согласуется с ее барьерно-диффузионным профилем: гидрофильная крахмальная матрица с полиольной пластификацией облегчает перенос влаги и низкомолекулярных соединений, что способствует высвобождению молочной кислоты и формированию зон ингибирования. Вместе с тем чрезмерная пластификация (за счет добавления большего количества молочной кислоты) потенциально снизила бы прочность пленки [56,57]. В целом, данные визуально и количественно подтверждают, что введение молочной кислоты обеспечивает воспроизводимый антимикробный эффект в отношении как грамотрицательных, так и грамположительных тест-штаммов, а пленочная форма позволяет реализовать это действие без потери функциональности материала как упаковочного.

Пленки с расчетной толщиной 0,1 мм и прочностью 75 МПа совместимы с распространенными операциями: резкой, термосваркой с буферным слоем, ламинацией. В многослойных конструкциях разработанный слой целесообразно располагать со стороны продукта; наружный гидрофобный слой (полиолефиновая кислота или воск) выполняет влагобарьерную функцию и повышает механическую защиту.

Отдельно стоит отметить соответствие наблюдаемого профиля свойств предполагаемым областям применения. Зафиксированная в сухих условиях (относительная влажность воздуха примерно 0%) крайне низкая газопроницаемость по O₂/CO₂ при одновременной высокой СПВП при температуре 38 °C и 90% относительной влажности воздуха указывает, что полученные пленки могут быть наиболее эффективны в контролируемо-влажных упаковочных средах: при хранении охлажденных мясных и молочных продуктов в газовой фазе с пониженной влажностью или при использовании впитывающих вкладышей сохранится кислородный барьер, тогда как при непосредственном контакте с увлажненной поверхностью запускается высвобождение молочной кислоты и реализуется антимикробный механизм.

Для мясного сырья, чувствительного к окислительной порче, сочетание кислородного барьера в газовой фазе и локально кислой среды на поверхности продукта потенциально устраняет две главные причины потери качества: окисление липидов и рост психротрофной микрофлоры. С учетом полученной прочности (75 МПа) и умеренной пластичности (относительное удлинение при разрыве 24%) пленки технологически пригодны для термических и механических операций при использовании в качестве упаковочного материала без риска разрушения. Их гидрофильная матрица в присутствии влаги ускоряет высвобождение кислоты, что согласуется с отмеченным в литературе ростом зон ингибирования при повышенной влажности полисахаридных пленок [51,57]. В испытаниях аналогичных активных биополимеров в условиях хранения при низких температурах (4 °C) сообщалось о снижении общей обсемененности и о замедлении окисления жиров у мясных систем. Полученные в настоящем исследовании результаты по диск-диффузионному тесту и барьерные характеристики указывают на функционально схожий механизм действия в реальных условиях хранения [58].

Для сыров и кисломолочных продуктов, где критична поверхностная контаминация плесенью и дрожжами, показанный кислотно-индуцированный антимикробный эффект, вероятно, усилится благодаря близкому к нейтральному pH субстрата и наличию свободной влаги на корке или срезе продукта. В этом случае барьерные свойства пленки на основе крахмала с низкой кислородной проницаемостью в сухой фазе и повышенной паропроницаемостью при высокой относительной влажности могут быть преимуществом благодаря сдерживанию окислительных процессов при одновременном подавлении поверхностной микрофлоры [34].

Ограничением для использования монослойной гидрофильной пленки остается влагобарьер при высокой влажности воздуха; на это прямо указывает измеренная СПВП. Для продуктов с требованием к стабильному уровню влаги (высокая активность воды и/или длительная логистика) целесообразен переход к многослойным пленкам, где разработанный активный слой выступает внутренним функциональным модулем, а внешний гидрофобный слой (например, полимолочная кислота) снижает влагоперенос. Такой подход позволит сохранить высокий кислородный барьер и антимикробную активность при минимизации сорбции воды; технологическая реализуемость и эффективность подобных материалов на основе крахмала и полимолочной кислоты многократно показана [56]. В случае полученных пленок механическая прочность базового слоя упрощает процесс упаковки без потери целостности, а гидрофильность внутреннего слоя обеспечивает доступность молочной кислоты при контакте с влажной поверхностью продукта.

Таким образом, сопоставление полученных количественных показателей с опубликованными примерами упаковок с антимикробной активностью демонстрирует сопоставимые результаты. Полученные зоны подавления роста *E. coli* и *B. subtilis*, а также низкая проницаемость для кислорода при относительной влажности воздуха около 0% соответствуют условиям, при которых для мясных и молочных продуктов отмечалось увеличение сроков хранения в холодильных условиях. Эти условия также приводили к снижению микробной обсемененности при контролируемой влажности и ограниченным доступе кислорода [30,58]. В совокупности результаты подтверждают практическую применимость разработанной системы: регулируемая влагой диффузия молочной кислоты и высокий кислородный барьер минимизируют основные риски порчи продуктов. Такая система может быть использована как однослойная пленка для продуктов с контролируемой влажностью или как часть многослойных влагозащитных пленок для упаковки других типов продуктов.

4. Выводы

В работе получены биоразлагаемые пленки на основе картофельного крахмала с добавлением глицерина и молочной кислоты методом литья из раствора. Сформированные покрытия были оптически однородными, без макродефектов. Толщина образцов распределилась на две статистические группы (S2/S4/S5 и S1/S3), при этом абсолютные различия незначительны и технологически ожидаемы для литья.

Пленки продемонстрировали сочетание высокой прочности и умеренной пластичности; для образцов S6–S7 ($74,8 \pm 7,4$ и $69,6 \pm 6,6$ МПа; $23,7 \pm 4,6$ и $26,3 \pm 4,8$ % соответственно) статистически значимых различий в прочности при растяжении и относительном удлинении не выявлено. В сравнении с известными для крахмальных систем свойствами такие значения указывают на плотную полимерную матрицу

при эффективной полиольной пластификации. Учитывая массовые соотношения компонентов (глицерин 20% от массы крахмала; молочная кислота 50% от массы крахмала), можно заключить, что пластифицирующее действие реализовано без критического снижения прочности, что согласуется с наблюдаемой морфологией и режимами желатинизации и сушки.

Барьерные испытания выявили характерный для гидрофильных полисахаридных пленок профиль: высокая скорость переноса водяного пара при температуре 38 °C и 90% относительной влажности ($1290,7\text{--}1440,4 \text{ г}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{сут}^{-1}$) при одновременной крайне низкой проницаемости по O_2 и CO_2 в сухих условиях (манометрический метод не достиг порога для расчета стационарной проницаемости). Это подтверждает, что полученные материалы обладают сильным кислородным барьером при низкой влажности и ограниченной влагозащитой при повышенной влажности.

Антимикробные испытания продемонстрировали статистически сопоставимые зоны ингибирования для дисков из полученной пленки и для 10% молочной кислоты, тогда как тетрациклин формировал достоверно большие зоны ингибирования; отрицательный контроль зон ингибирования не давал. Различия между пленкой и свободной молочной кислотой статистически незначимы, что указывает на эффективное высвобождение кислоты из матрицы и сохранение ее активности в составе пленки.

Дополнительно отметим практическую применимость. Низкая проницаемость по O_2 в сухой фазе (относительная влажность 0%) при повышенной СПВП во влажной среде (относительная влажность 90%) делает пленки релевантными для полусухих или контролируемо-влажных условий хранения, а также в качестве внутреннего активного слоя в многослойных конструкциях с гидрофобным наружным слоем.

Ограничения исследования определяют направления последующих экспериментов: отсутствует карта газо-/влагопереноса при переменной влажности — ее получение позволит точно определить категории продуктов для упаковки полученными пленками; не изучена кинетика высвобождения и переноса молочной кислоты и ее остаточные уровни в пищевой матрице — необходимы испытания по миграции и сенсорике для целевых продуктов; антимикробная активность оценена на *E. coli* и *B. subtilis* в модельных условиях — для внедрения целесообразно расширить перечень (в т. ч. психротрофы, дрожжи/плесени) и провести исследования при низких температурах хранения (4 °C) *in situ*.

В прикладном плане наиболее перспективными являются следующие направления работы: многослойная валидация (дополнительный слой из полимолочной кислоты или воска) с размещением активного слоя к продукту; оптимизация состава (поверхностный отклик по соотношению глицерина к молочной кислоте и к массовой доле сухих веществ) под требуемый баланс прочности, эластичности, барьерных свойств и антимикробной активности; долговременная стабильность пленок (старение при 4 °C и 23 °C, циклы влажности) и масштабирование разлива (контроль pH/вязкости и равномерности толщины). При позитивных результатах необходимо оценить соответствие компостируемости.

Полученные данные подтверждают, что исследованные пленки могут служить микробиологически активным слоем для упаковки кислород-чувствительных продуктов при контролируемой влажности. Дальнейшая адаптация упаковочного материала на основе этих пленок к конкретным категориям (мясо/птица, сыры, свежие плоды) определяется уже не принципиальными ограничениями материала, а выбором архитектуры упаковки и режимов эксплуатации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / REFERENCES

- Santos, R. G., Machovsky-Capuska, G. E., Andrade, R. (2021). Plastic ingestion as an evolutionary trap: Toward a holistic understanding. *Science*, 373(6550), 56–60. <https://doi.org/10.1126/science.abh0945>
- van Grinsven, S., Schubert, C. (2023). Soil-biodegradable plastic films do not decompose in a lake sediment over 9 months of incubation. *Biogeosciences*, 20(19), 4213–4220. <https://doi.org/10.5194/bg-20-4213-2023>
- Campanale, C., Galafassi, S., Di Pippo, F., Pojar, I., Massarelli, C., Uricchio, V. F. (2024). A critical review of biodegradable plastic mulch films in agriculture: Definitions, scientific background and potential impacts. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 170, Article 117391. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2023.117391>
- Jambeck, J. R., Geyer, R., Wilcox, C., Siegler, T. R., Perryman, M., Andrady, A. et al. (2015). Plastic waste inputs from land into the ocean. *Science*, 347(6223), 768–771. <https://doi.org/10.1126/science.1260352>
- Chamas, A., Moon, H., Zheng, J., Qiu, Y., Tabassum, T., Jang, J. H. et al. (2020). Degradation rates of plastics in the environment. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 8(9), 3494–3511. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.9b06635>
- Koelmans, A. A., Bakir, A., Burton, G. A., Janssen, C. R. (2016). Microplastic as a vector for chemicals in the aquatic environment: Critical review and model-supported reinterpretation of empirical studies. *Environmental Science and Technology*, 50(7), 3315–3326. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b06069>
- Bjedov, D., Velki, M., Toth, L., Marijić, V. F., Mikuška, T., Jurinović, L. et al. (2023). Heavy metal (loid) effect on multi-biomarker responses in apex predator: Novel assays in the monitoring of white stork nestlings. *Environmental Pollution*, 324, Article 121398. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.121398>
- Xiong, L., Li, Z., Shah, F., Wang, P., Yuan, Q., Wu, W. (2024). Biodegradable mulch film enhances the environmental sustainability compared with traditional polyethylene film from multidimensional perspectives. *Chemical Engineering Journal*, 492, Article 152219. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.152219>
- de Sadeleer, I., Woodhouse, A. (2024). Environmental impact of biodegradable and non-biodegradable agricultural mulch film: A case study for Nordic conditions. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 29(2), 275–290. <https://doi.org/10.1007/s11367-023-02253-y>

10. Nikiema, J., Asiedu, Z. (2022). A review of the cost and effectiveness of solutions to address plastic pollution. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(17), 24547–24573. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-18038-5>
11. Cordier, M., Uehara, T., Jorgensen, B., Baztan, J. (2024). Reducing plastic production: Economic loss or environmental gain? *Cambridge Prisms: Plastics*, 2, Article e2. <https://doi.org/10.1017/plc.2024.3>
12. Döhler, N., Wellenreuther, C., Wolf, A. (2022). Market dynamics of biodegradable bio-based plastics: Projections and linkages to European policies. *EFB Bioeconomy Journal*, 2, Article 100028. <https://doi.org/10.1016/j.bioeco.2022.100028>
13. Vroman, I., Tighzert, L. (2009). Biodegradable polymers. *Materials*, 2(2), 307–344. <https://doi.org/10.3390/ma2020307>
14. Onyeaka, H., Obileke, K., Makaka, G., Nwoko, N. (2022). Current research and applications of starch-based biodegradable films for food packaging. *Polymers*, 14(6), Article 1126. <https://doi.org/10.3390/polym14061126>
15. Henning, F. G., Ito, V. C., Demiate, I. M., Lacerda, L. G. (2022). Non-conventional starches for biodegradable films: A review focussing on characterisation and recent applications in food packaging. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*, 4, Article 100157. <https://doi.org/10.1016/j.carpta.2021.100157>
16. Mukherjee, C., Varghese, D., Krishna, J. S., Boominathan, T., Rakeshkumar, R., Dineshkumar, S. et al. (2023). Recent advances in biodegradable polymers—properties, applications and future prospects. *European Polymer Journal*, 192, Article 112068. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2023.112068>
17. Thakur, R., Pristijono, P., Scarlett, C. J., Bowyer, M., Singh, S. P., Vuong, Q. V. (2019). Starch-based films: Major factors affecting their properties. *International Journal of Biological Macromolecules*, 132, 1079–1089. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.03.190>
18. Ramírez-Hernández, A., Aparicio-Saguilán, A., Reynoso-Meza, G., Carrillo-Ahumada, J. (2017). Multi-objective optimization of process conditions in the manufacturing of banana (*Musa paradisiaca* L.) starch/natural rubber films. *Carbohydrate Polymers*, 157, 1125–1133. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.10.083>
19. Pooja, N., Banik, S., Chakraborty, I., Sudeeksha, H. C., Mal, S. S., Srisungsitthisunti, P. et al. (2024). Comparative analysis of biopolymer films derived from corn and potato starch with insights into morphological, structural and thermal parameters. *Discover Sustainability*, 5(1), Article 467. <https://doi.org/10.1007/s43621-024-00626-3>
20. Sirbu, E. E., Dinita, A., Tănase, M., Portoacă, A.-I., Bondarev, A., Enascuta, C.-E. et al. (2024). Influence of plasticizers concentration on thermal, mechanical, and physicochemical properties on starch films. *Processes*, 12(9), Article 2021. <https://doi.org/10.3390/pr12092021>
21. Wang, B., Yu, B., Yuan, C., Guo, L., Liu, P., Gao, W. et al. (2022). An overview on plasticized biodegradable corn starch-based films: The physicochemical properties and gelatinization process. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 62(10), 2569–2579. <https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1868971>
22. Tarique, J. S. M. S., Sapuan, S. M., Khalina, A. (2021). Effect of glycerol plasticizer loading on the physical, mechanical, thermal, and barrier properties of arrowroot (*Maranta arundinacea*) starch biopolymers. *Scientific Reports*, 11(1), Article 13900. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-93094-y>
23. Nasir, N. N., Othman, S. A. (2021). The physical and mechanical properties of corn-based bioplastic films with different starch and glycerol content. *Journal of Physical Science*, 32(3), 89–100. <https://doi.org/10.21315/jps2021.32.3.7>
24. Ortega, F., Giannuzzi, L., Arce, V. B., García, M. A. (2017). Active composite starch films containing green synthesized silver nanoparticles. *Food Hydrocolloids*, 70, 152–162. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2017.03.036>
25. Romainor, A. N., Chin, S. F., Lihan, S. (2022). Antimicrobial starch-based film for food packaging application. *Starch*, 74(3–4), Article 2100207. <https://doi.org/10.1002/star.202100207>
26. Wardein, S., Waclawek, S., Dudek, G. (2024). Improving antimicrobial properties of biopolymer-based films in food packaging: Key factors and their impact. *International Journal of Molecular Sciences*, 25(23), Article 12580. <https://doi.org/10.3390/ijms252312580>
27. Pandey, V. K., Islam, R. U., Shams, R., Dar, A. H. (2022). A comprehensive review on the application of essential oils as bioactive compounds in Nano-emulsion based edible coatings of fruits and vegetables. *Applied Food Research*, 2(1), Article 100042. <https://doi.org/10.1016/j.afres.2022.100042>
28. Jackson-Davis, A., White, S., Kassama, L. S., Coleman, S., Shaw, A., Mendonca, A. et al. (2023). A review of regulatory standards and advances in essential oils as antimicrobials in foods. *Journal of Food Protection*, 86(2), Article 100025. <https://doi.org/10.1016/j.jfp.2022.100025>
29. Kaur, P., Alam, T., Singh, H., Jain, J., Singh, G., Broadway, A. A. (2023). Organic acids modified starch — CMC based biodegradable film: Antibacterial activity, morphological, structural, thermal, and crystalline properties. *Journal of Pure and Applied Microbiology*, 17(1), 241–257. <https://doi.org/10.22207/JPAM.17.1.14>
30. Madivoli, E. S., Kisato, J., Gichuki, J., Wangui, C. M., Kimani, P. K., Kareru, P. G. (2024). Antimicrobial and food barrier properties of polyvinyl alcohol–lactic acid food packaging films. *Food Science and Nutrition*, 12(9), 6563–6577. <https://doi.org/10.1002/fsn5.4291>
31. Wanda, S., Paulsen, P., Budai, M., Vali, S., Smulders, F. J. (2013). Incorporation of lactic acid as an antimicrobial agent in polyamide food-packaging films. *Archiv Für Lebensmittelhygiene*, 64(1), 8–14. <https://doi.org/10.2376/0003-925X-64-8>
32. Zhao, Z., Liu, H., Tang, J., He, B., Yu, H., Xu, X. et al. (2023). Pork preservation by antimicrobial films based on potato starch (PS) and polyvinyl alcohol (PVA) and incorporated with clove essential oil (CLO) Pickering emulsion. *Food Control*, 154, Article 109988. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2023.109988>
33. Nikmanesh, A., Baghaei, H., Nafchi, A. M. (2023). Development and characterization of antioxidant and antibacterial films based on potato starch incorporating *Viola odorata* extract to improve the oxidative and microbiological quality of chicken fillets during refrigerated storage. *Foods*, 12(15), Article 2955. <https://doi.org/10.3390/foods12152955>
34. Mei, J., Guo, Q., Wu, Y., Li, Y. (2015). Evaluation of chitosan–starch–based edible coating to improve the shelf life of bod Ljong cheese. *Journal of Food Protection*, 78(7), 1327–1334. <https://doi.org/10.4315/0362-028X.JFP-14-402>
35. Wang, Q., Chen, W., Zhu, W., McClements, D. J., Liu, X., Liu, F. (2022). A review of multilayer and composite films and coatings for active biodegradable packaging. *npj Science of Food*, 6(1), Article 18. <https://doi.org/10.1038/s41538-022-00132-8>
36. Carpena, M., Nuñez-Estevéz, B., Soria-López, A., García-Oliveira, P., Prieto, M. A. (2021). Essential oils and their application on active packaging systems: A review. *Resources*, 10(1), Article 7. <https://doi.org/10.3390/resources10010007>
37. Sharma, S., Barkauskaite, S., Jaiswal, A. K., Jaiswal, S. (2021). Essential oils as additives in active food packaging. *Food Chemistry*, 343, Article 128403. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128403>
38. Othman, S. H., Wane, B. M., Nordin, N., Noor Hasnan, N. Z., A. Talib, R., Karyadi, J. N. W. (2021). Physical, mechanical, and water vapor barrier properties of starch/cellulose nanofiber/thymol bionanocomposite films. *Polymers*, 13(23), Article 4060. <https://doi.org/10.3390/polym13234060>
39. Schmidt, V. C. R., Porto, L. M., Laurindo, J. B., Menegalli, F. C. (2013). Water vapor barrier and mechanical properties of starch films containing stearic acid. *Industrial Crops and Products*, 41, 227–234. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2012.04.038>
40. Petronilho, S., Oliveira, A., Domingues, M. R., Nunes, F. M., Coimbra, M. A., Gonçalves, I. (2021). Hydrophobic starch-based films using potato washing slurries and spent frying oil. *Foods*, 10(12), Article 2897. <https://doi.org/10.3390/foods10122897>
41. Hou, T., Ma, S., Wang, F., Wang, L. (2023). A comprehensive review of intelligent controlled release antimicrobial packaging in food preservation. *Food Science and Biotechnology*, 32(11), 1459–1478. <https://doi.org/10.1007/s10068-023-01344-8>
42. Bangar, S. P., Purewal, S. S., Trif, M., Maqsood, S., Kumar, M., Manjunatha, V. et al. (2021). Functionality and applicability of starch-based films: An eco-friendly approach. *Foods*, 10(9), Article 2181. <https://doi.org/10.3390/foods10092181>
43. Domene-López, D., García-Quesada, J. C., Martín-Gullón, I., Montalbán, M. G. (2019). Influence of starch composition and molecular weight on physicochemical properties of biodegradable films. *Polymers*, 11(7), Article 1084. <https://doi.org/10.3390/polym11071084>
44. ASTM D882–18 Standard test method for tensile properties of thin plastic sheeting. American Society for Testing and Material, 1995. <https://doi.org/10.1520/D0882-18>
45. ASTM E96/E96M-22a Standard test methods for gravimetric determination of water vapor transmission rate of materials. American Society for Testing and Materials, 2022. https://doi.org/10.1520/E0096_E0096M-22A
46. ASTM D1434–82(2015) e1 Standard test method for determining gas permeability characteristics of plastic film and sheeting. American Society for Testing and Materials, 2023. <https://doi.org/10.1520/D1434-82R15E01>
47. Balouiri, M., Sadiki, M., Ibensouda, S. K. (2016). Methods for *in vitro* evaluating antimicrobial activity: A review. *Journal of Pharmaceutical Analysis*, 6(2), 71–79. <https://doi.org/10.1016/j.jpha.2015.11.005>
48. Mali, S., Grossmann, M. V. E., García, M. A., Martino, M. N., Zaritzky, N. E. (2002). Microstructural characterization of yam starch films. *Carbohydrate Polymers*, 50(4), 379–386. [https://doi.org/10.1016/S0144-8617\(02\)00058-9](https://doi.org/10.1016/S0144-8617(02)00058-9)
49. Romero-Bastida, C. A., Bello-Pérez, L. A., García, M. A., Martino, M. N., Solorza-Feria, J., Zaritzky, N. E. (2005). Physicochemical and microstructural characterization of films prepared by thermal and cold gelatinization from non-conventional sources of starches. *Carbohydrate Polymers*, 60(2), 235–244. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2005.01.004>
50. Singh, G. P., Bangar, S. P., Yang, T., Trif, M., Kumar, V., Kumar, D. (2022). Effect on the properties of edible starch-based films by the incorporation of additives: A review. *Polymers*, 14(10), Article 1987. <https://doi.org/10.3390/polym14101987>
51. Basiak, E., Lenart, A., Debeaufort, F. (2018). How glycerol and water contents affect the structural and functional properties of starch-based edible films. *Polymers*, 10(4), Article 412. <https://doi.org/10.3390/polym10040412>
52. Majzoobi, M., Beparva, P. (2014). Effects of acetic acid and lactic acid on physicochemical characteristics of native and cross-linked wheat starches. *Food Chemistry*, 147, 312–317. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.09.148>
53. Bertuzzi, M. A., Vidaurre, E. F. C., Armada, M., Gottifredi, J. C. (2007). Water vapor permeability of edible starch based films. *Journal of Food Engineering*, 80(3), 972–978. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.07.016>
54. Santhosh, R., Ahmed, J., Thakur, R., Sarkar, P. (2024). Starch-based edible packaging: Rheological, thermal, mechanical, microstructural, and barrier properties — A Review. *Sustainable Food Technology*, 2(2), 307–330. <https://doi.org/10.1039/D3FB00211J>
55. ASTM D3985–17 Standard test method for oxygen gas transmission rate through plastic film and sheeting using a coulometric sensor. American Society for Testing and Materials, 2024. <https://doi.org/10.1520/D3985-17>
56. Muller, J., González-Martínez, C., Chiralt, A. (2017). Combination of poly (lactic) acid and starch for biodegradable food packaging. *Materials*, 10(8), Article 952. <https://doi.org/10.3390/ma10080952>
57. Sanyang, M. L., Sapuan, S. M., Jawaid, M., Ishak, M. R., Sahari, J. (2016). Development and characterization of sugar palm starch and poly (lactic acid) bi-layer films. *Carbohydrate Polymers*, 146, 36–45. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.03.051>
58. Hernández-Nolasco, Z., Ríos-Corripio, M. A., Hidalgo-Contreras, J. V., Castellano, P. H., Rubio-Rosas, E., Hernández-Cázares, A. S. (2024). Optimization of sodium alginate, taro starch and lactic acid based biodegradable films: Antimicrobial effect on a meat product. *LWT*, 192, Article 115718. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.115718>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ	AUTHOR INFORMATION
Принадлежность к организации	Affiliation
<p>Путилов Владислав Эдуардович — лаборант-исследователь, Лаборатория биотехнологии и биоинженерии, Всероссийский научно-исследовательский институт пищевых добавок 191014, Россия, г. Санкт-Петербург, Литейный пр., 55. Магистр, факультет биотехнологии, Национальный исследовательский университет ИТМО 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9 E-mail: vladislav.e.putilov@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0009-0004-8138-4727 * автор для контактов</p>	<p>Vladislav E. Putilov, Research Assistant, Laboratory of Biotechnology and Bioengineering, All-Russian Research Institute of Food Additives 55, Liteiny pr., 191014, St. Petersburg, Russia Master's Student, Faculty of Biotechnology, ITMO University 9, Lomonosova Str., 191002, St. Petersburg, Russia E-mail: vladislav.e.putilov@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0009-0004-8138-4727 * corresponding author</p>
<p>Непомнящий Анатолий Павлович — научный сотрудник, Лаборатория биотехнологии и биоинженерии, Всероссийский научно-исследовательский институт пищевых добавок 191014, Санкт-Петербург, Литейный пр., 55 E-mail: nepomnyashiy.95@mail.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0088-2704</p>	<p>Anatoliy P. Nepomnyashchiy, Research Scientist, Laboratory of Biotechnology and Bioengineering, All-Russian Research Institute of Food Additives 55, Liteiny pr., 191014, St. Petersburg, Russia E-mail: nepomnyashiy.95@mail.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0088-2704</p>
<p>Причепе Артем Олегович — младший научный сотрудник, Лаборатория биотехнологии и биоинженерии, Всероссийский научно-исследовательский институт пищевых добавок 191014, Санкт-Петербург, Литейный пр., 55 E-mail: prichepa.a@yandex.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1037-5629</p>	<p>Artem O. Prichepa, Junior Research Scientist, Laboratory of Biotechnology and Bioengineering, All-Russian Research Institute of Food Additives 55, Liteiny pr., 191014, St. Petersburg, Russia E-mail: prichepa.a@yandex.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1037-5629</p>
<p>Белова Дарья Дмитриевна — старший научный сотрудник, Лаборатория биотехнологии и биоинженерии, Всероссийский научно-исследовательский институт пищевых добавок 191014, Санкт-Петербург, Литейный пр., 55 E-mail: antonina-daria@mail.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0630-7658</p>	<p>Daria D. Belova, Senior Research Scientist, Laboratory of Biotechnology and Bioengineering, All-Russian Research Institute of Food Additives 55, Liteiny pr., 191014, St. Petersburg, Russia E-mail: antonina-daria@mail.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0630-7658</p>
<p>Шарова Наталья Юрьевна — доктор технических наук, профессор РАН, заместитель директора по научной работе, Всероссийский научно-исследовательский институт пищевых добавок 190000, Санкт-Петербург, Литейный пр., 55 доцент практики, факультет биотехнологий, Национальный исследовательский университет ИТМО 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9 E-mail: natalya_sharova1@mail.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4208-9299</p>	<p>Natalya Yu. Sharova, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Russian Academy of Sciences, Deputy Director for Research, All-Russian Research Institute for Food Additives 55, Liteiny pr., 190000, St. Petersburg, Russia Docent of the Practice, Faculty of Biotechnology, ITMO University 9, Lomonosova Str., 191002, St. Petersburg, Russia E-mail: natalya_sharova1@mail.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4208-9299</p>
Критерии авторства	Contribution
<p>Путилов В. Э. — проведение исследований, создание рисунков и таблиц, систематизация данных Непомнящий А. П. — проведение исследований, систематизация результатов Причепе А. О. — проведение информационных исследований Белова Д. Д. — систематизация результатов информационных данных, редактирование статьи Шарова Н. Ю. — систематизация результатов информационных данных, редактирование статьи</p>	<p>Putilov V. E. — conducting research, preparation of figures and tables, systematization of data Nepomnyashchiy A. P. — conducting research, systematization of results Prichepa A. O. — conducting information research Belova D. D. — systematization of informational data, editing of the manuscript Sharova N. Y. — systematization of informational data, editing of the manuscript</p>
Конфликт интересов	Conflict of interest
<p>Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.</p>	<p>The authors declare no conflict of interest.</p>

DOI: <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-4-506-514>



Поступила 27.06.2025

Поступила после рецензирования 12.11.2025

Принята в печать 17.11.2025

© Мистенева С. Ю., 2025

<https://www.fsjour.com/jour>

Научная статья

Открытый доступ

ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ ПЕНООБРАЗНЫХ ЭМУЛЬСИЙ ДЛЯ КЕКСОВ

Мистенева С. Ю.

Всероссийский научно-исследовательский институт кондитерской промышленности, Москва, Россия

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: АННОТАЦИЯ

кексы, пенообразная
эмульсия, структуро-
образование, вязкость,
напряжение сдвига,
добавленный сахар,
жир

Неинфекционные заболевания, связанные с рационами питания, представляют собой серьезную проблему мирового здравоохранения. Одной из ключевых стратегий по борьбе с ними является расширение ассортимента доступных пищевых продуктов, в том числе мучных кондитерских изделий, с полезным профилем пищевых веществ. В работе изучен характер структурообразования пенообразных эмульсий для кексов. Свойства эмульсий определяют качество готовых изделий. Модификация рецептурного состава изделий осуществлялась путем снижения добавленного сахара и жира и использования сухих молочных продуктов и сыворотки. Добавление сухих молочных продуктов и сыворотки приводило к увеличению вязкости эмульсий. Максимальную вязкость предельно неразрушенной структуры имел образец эмульсии с молоком цельным сухим ($162,8 \pm 8,1$ Па·с), что превышало значение данного показателя в контрольном образце ($36,1 \pm 1,8$ Па·с) в 4,5 раза. При этом основное снижение вязкости у всех образцов происходило в диапазонах незначительных скоростей сдвига (до $\dot{\gamma} = 3$ сек⁻¹), что указывало на их низкую структурную прочность. Динамический предел текучести всех эмульсий с порошкообразным сырьем превышал значение в контрольном образце ($22,4 \pm 1,1$ Па). Это свидетельствовало об изменении характера течения полученных систем за счет формирования более прочных структурных свойств. В работе определена реологическая модель течения образцов эмульсий модифицированного состава и контрольного образца и получены математические уравнения данного процесса. Установлено, что применение сухих молочных продуктов, сыворотки и разработанных технологических приемов обеспечивало формирование в пищевой системе структурообразующей воздушной фазы в необходимом количестве. Плотность исследуемых образцов изменялась незначительно по сравнению с контрольным ($590 \pm 5,3$ кг/м³), и превышала его значение на 2 % в эмульсии с молоком цельным сухим ($600 \pm 5,6$ кг/м³), на 3 % — с молоком сухим обезжиренным ($610 \pm 5,5$ кг/м³) и на 5 % — с сухой молочной сывороткой ($620 \pm 5,6$ кг/м³). Результаты исследований стали основой разработки технологии кексов со сниженным содержанием критически значимых веществ в соответствии с принципами здорового питания.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Статья подготовлена в рамках выполнения исследований по государственному заданию № FGUS-2022-0007 Федерального научного центра пищевых систем им. В. М. Горбатова Российской академии наук.

Received 27.06.2025

Accepted in revised 12.11.2025

Accepted for publication 17.11.2025

© Misteneva S. Yu., 2025

Available online at <https://www.fsjour.com/jour>

Original scientific article

Open access

SPECIFIC FEATURES OF STRUCTURE FORMATION OF FOAM-LIKE EMULSIONS FOR MUFFINS

Svetlana Yu. Misteneva

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

KEYWORDS:

muffins, foam-like
emulsion, structure
formation, viscosity,
shear stress, added
sugar, fat

ABSTRACT

Diet-related noncommunicable diseases (NCDs) are a major global health problem. One of the main strategies for NCDs prevention is an increase in a range of available food products, including flour confectionery, with the beneficial nutrient profile. In this paper the character of structure formation in foam-like emulsions for muffins was investigated. The properties of emulsions determine quality of finished products. The recipe composition of muffins was modified by reducing added sugar and fat and incorporating whole and skim milk powders and whey powder. The incorporation of these powders caused an increase in the viscosity of emulsions. The emulsion with whole milk powder had the highest viscosity of undisturbed structure (162.8 ± 8.1 Pa·s), which was 4.5 times higher than that in the control sample (36.1 ± 1.8 Pa·s). The main decrease in viscosity of all samples was noticed at low ranges of shear rate (up to $\dot{\gamma} = 3$ s⁻¹), that pointed to low structure strength of emulsions. The values of the dynamic yield strength for all emulsions with powdered raw materials exceeded the value in the control sample (22.4 ± 1.1 Pa). This indicated a change in the flow behavior of the modified systems due to the formation of stronger structural properties. In this study, the rheological model of flow for the samples of emulsions with the modified composition and the control sample was determined and mathematical equations of this process were obtained. It was found that the use of dry milk products and whey powder, and the developed techniques ensured the formation of the necessary amount of structure-forming air phase in the food system. Density of the experimental samples changed insignificantly compared to the control (590 ± 5.3 kg/m³) and was higher than this value in the control by 2 % in the emulsion with whole milk powder (600 ± 5.6 kg/m³), by 3 % — with skim milk powder (610 ± 5.5 kg/m³) and by 5 % — with whey powder (620 ± 5.6 kg/m³). The research results form the basis for the development of technology for muffins with the reduced content of the critically important ingredients according to the principles of healthy nutrition.

FUNDING: The article was prepared as part of the research under the state assignment № FGUS-2022-0007 of the V. M. Gorbatov Federal Research Center for Food Systems of the Russian Academy of Science.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Мистенева, С. Ю. (2025). Особенности структурообразования пенообразных эмульсий для кексов. *Пищевые системы*, 8(4), 506–514. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-4-506-514>

FOR CITATION: Misteneva, S. Yu. (2025). Specific features of structure formation of foam-like emulsions for muffins. *Food Systems*, 8(4), 506–514. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-4-506-514>

1. Введение

Распространенность избыточного веса, ожирения и других неинфекционных заболеваний, связанных с рационами питания, в современном обществе высока и продолжает расти, что отрицательно сказывается на продолжительности и качестве жизни населения. В частности, значимой проблемой, требующей серьезных и согласованных действий, является рост избыточного веса и ожирения среди детей и подростков [1]. Для обеспечения здорового образа жизни необходим целостный подход, включающий физическую активность, социальную среду и информирование о формировании адекватных рационов питания. Кроме того, важным фактором такого подхода является доступность пищевых продуктов, в том числе мучных кондитерских изделий, которые обеспечивают поддержание оптимальных рационов питания [2,3].

При проведении технологических процессов производства многокомпонентных пищевых систем большое значение имеют их реологические свойства, определяющие реакцию дисперсных систем на внешние воздействия. Реологические свойства в первую очередь определяются рецептурным составом и могут использоваться для прогнозирования поведения пищевых систем в процессе технологической обработки. Кроме того, реологические свойства пищевых систем оказывают существенное влияние на качественные характеристики готовых изделий [4–6]. Для описания реологического поведения пищевых материалов используют различные реологические уравнения: Гершеля–Балкли, Оствальда де Вилия, Кассона и другие [7,8].

Кексы являются одним из распространенных видов мучных кондитерских изделий. В 2022 году объем производства кексов составил 43 тыс. т, и эта цифра продолжает расти из-за спроса на продукты для перекусов [9].

Основой формирования структуры кексов является наличие технологической стадии сбивания, обеспечивающей включение в систему значительного количества воздушной фазы. По технологическим особенностям производства и формирования структурно-механических свойств кексы, наряду с бисквитными полуфабрикатами и некоторыми видами сдобного печенья, могут быть выделены в отдельную категорию — сбивные кондитерские изделия мучной группы. В характеристике пищевых систем сбивные кондитерские изделия мучной группы представляют собой твердую упругую пену, в которой степень аэрации и структура воздушных пузырьков являются основой формирования качества. Твердые пены являются трехмерными грубодисперсными высококонцентрированными системами, дисперсной фазой которых является газовая фаза, заключенная во взаимосвязанную сеть. Основные структурные особенности сбивных кондитерских изделий мучной группы заключаются в отсутствии хрупкости, достаточной эластичности мякиша и наличии значительной пористости, обусловленной присутствием большого количества воздушных пустот внутри твердой матрицы [10–13].

При нагревании в процессе выпечки воздушные ячейки значительно увеличиваются за счет теплового расширения и поглощения углекислого газа из разрыхлителей и образующегося водяного пара. На этом этапе очень важны свойства поверхностной эластичности слоев, окружающих воздушные ячейки. В конце процесса выпечки воздушные ячейки соединяются в открытую сеть, а капли жидкого жира объединяются в пленку, покрывающую внутреннюю поверхность воздушных каналов [14]. Таким образом, воздушная фаза является важным структурным элементом сбивных изделий, обеспечивающим их идентификационные характеристики, формирующим реологические свойства полуфабрикатов и структурно-механические свойства готовых изделий.

В категории кексов существует ограниченное количество вариантов с пониженным содержанием сахара и жира, что, вероятно, связано с технологическими трудностями производства таких продуктов, поскольку данные виды сырья играют одну из основных ролей в формировании их пенообразной структуры.

Сахароза играет важную технологическую роль в процессе производства кексов, участвуя в формировании идентификационных признаков, объема, пористости, цвета, повышении сохранности. Сахароза также оказывает влияние на физико-химические и структурно-механические свойства теста. В процессе тестообразования происходит гидратация белков муки с образованием клейковины, увеличение количества которой свыше определенного уровня придает готовым изделиям излишнюю плотность и жесткость. Добавление сахара обеспечивает увеличение частичной концентрации дисперсионной среды, приводя к снижению осмотического набухания белков муки и препятствуя развитию клейковины. Сахар, добавляемый в определенном количестве в тесто, способствует снижению его

плотности за счет удержания большего количества воздушной фазы на стадии сбивания. Сахароза снижает температуру клейстеризации крахмала и денатурации белка при выпечке кексов, обеспечивая рост пузырьков воздуха за счет действия углекислого газа и пара до момента затвердевания тестовой заготовки [15,16].

Одним из ключевых ингредиентов в производстве кексов являются жиры. Входящие в состав изделий жиры оказывают значительное влияние на сохранность готовой продукции, ее функциональные (мягкость, текстуру, структурную целостность) и технологические свойства (удержание пузырьков воздуха, теплообмен тестовых заготовок, срок годности). Источниками жира в сбивных мучных кондитерских изделиях могут являться маргарин, сливочное масло, молочные и яичцепродукты и т. д. Каждая категория жиров (насыщенные, моно- или полиненасыщенные) обладает специфической структурой и свойствами, что усложняет их сокращение или замену в рецептуре изделий. Жиры при комнатной температуре существуют в жидком и/или кристаллическом состояниях. Количество кристаллической фазы в жире и, как следствие, его пластичность оказывают значительное влияние на процессы гомогенизации, коалесценции и образования структуры пищевой системы, в связи с этим профиль плавления жиров является одной из важных характеристик их качества. Пластические свойства жиров также существенно влияют на их способность захватывать и удерживать воздушную фазу в процессе сбивания [17–20].

Известно, что пищевые пены можно стабилизировать присутствующими природными поверхностно-активными веществами, такими как белки. Поверхностные вязкоупругие свойства белков могут существенно повысить стабильность пены за счет снижения скорости отделения и стекания жидкости — дисперсионной среды [21–23]. Белки молока можно разделить на две основные группы: казеины (~80%) и сывороточные белки (~20%). Казеины представляют собой гетерогенную группу фосфопротеинов и содержатся в молоке преимущественно в мицеллярной форме, т. е. включены в состав высокогидратированных казеиновых мицелл. Сывороточные белки, которые представляют собой более мелкие глобулярные белки с относительно высокой гидрофобностью, хорошо известны своей поверхностной активностью при образовании пищевых пен. Сывороточный альбумин является хорошим пенообразователем, который также обеспечивает хорошую стабильность пены благодаря своей способности образовывать вязкоупругие межфазные пленки [24–26]. В случае казеина амфифильная природа молекул придает ему высокие поверхностно-активные и, следовательно, функциональные свойства: сбивание, вспенивание, эмульгирование. Сывороточные белки не являются амфифильными по своей природе и обычно имеют более низкую поверхностную активность, чем казеин. Однако их свойства стабилизировать пену превосходят свойства казеина, поскольку на границе раздела воздух/жидкость образуется более жесткая пленка [27,28].

Цель работы — изучение качественных и реологических характеристик пенообразных эмульсий для кексов при снижении в их составе добавленного сахара и жира, а также при введении сухих молочных продуктов и сухой молочной сыворотки.

2. Объекты и методы

Объектами исследований на разных этапах работы являлись сахаро-жировые смеси, представляющие собой смесь жирового продукта и сахара белого, и пенообразные эмульсии для кексов, получаемые в результате сбивания сахаро-жировой смеси с яичцепродуктами. Сухие молочные продукты (молоко сухое цельное и молоко сухое обезжиренное по ГОСТ 33629-2015¹) и сухая молочная сыворотка (по ГОСТ 33958-2016²) были проанализированы с целью уточнения их химического состава. Технологический процесс получения сахаро-жировых смесей и пенообразных эмульсий осуществлялся по [29] с использованием лабораторного планетарного миксера Kenwood KMC 560 (Kenwood, Англия). Для получения контрольных образцов сахаро-жировой смеси и эмульсии использована типовая рецептура кекса на химических разрыхлителях. Модельные образцы сахаро-жировых смесей и эмульсий получены при модификации рецептуры контрольного образца путем снижения в нем содержания добавленного сахара, жира и введения сухих молочных продуктов и сухой молочной сыворотки. Рецептурные соотношения кексов для получения сахаро-жировых смесей и эмульсий контрольного и модельных образцов представлены в Таблице 1.

¹ ГОСТ 33629–2015 «Молоко сухое. Технические условия». М.: Стандартинформ, 2017. — 13 с.

² ГОСТ 33958–2016 «Сыворотка молочная сухая. Технические условия». М.: Стандартинформ, 2019. — 11 с.

Таблица 1. Рецептурные соотношения кексов для получения сахаро-жировых смесей и эмульсий контрольного и модельных образцов

Table 1. Recipe ratios in muffins used to obtain sugar-fat mixtures and emulsions of the control and model samples

Наименование сырья и полуфабрикатов	Соотношение сырья, %	
	Контрольный образец	Модельный образец
Мука пшеничная хлебопекарная высшего сорта	24,6	32,0
Сахар белый	24,6	17,8
Жировой продукт	24,7	18,0
Сухие молочные продукты/сухая молочная сыворотка	—	8,0
Яйцепродукты	26,0	21,6
Вода	—	2,5
Аммоний углекислый	0,1	0,1
ИТОГО:	100,0	100,0

В качестве жирового продукта использовался маргарин по ГОСТ 32188–2013³ со следующими характеристиками: массовая доля жира 82%, содержание твердого жира при температуре 20 °C 16–18%, температура плавления жира, выделенного из маргарина, 33–35 °C. В качестве яйцепродуктов использовались яйца куриные по ГОСТ 31654–2012⁴. При проведении исследований применялся сахар белый по ГОСТ 33222–2017⁵.

Контроль температуры при проведении исследований осуществлялся с помощью лабораторного жидкостного термометра по ГОСТ 28498–90⁶ с диапазоном измерения температур от 0 до 100 °C с ценой деления 1 °C. Для фиксации времени использовали трехканальный лабораторный таймер Stegler TL-303 (Stegler, Китай). Проведение взвешиваний осуществлялось на электронных лабораторных весах AND GF 1000 (A&D, Япония) с точностью до 0,01 грамма. Массовую долю влаги сухих молочных продуктов и сухой молочной сыворотки определяли по ГОСТ 29246–91⁷ методом высушивания анализируемой пробы при температуре (102 ± 2) °C в сушильном шкафу СЭШ-3М-02 (ООО «Таглер», Россия). Массовую долю жира сухих молочных продуктов и сухой молочной сыворотки определяли по ГОСТ 29247–91⁸. Определение общего белка в сухих молочных продуктах и в сухой молочной сыворотке осуществляли по ГОСТ 25179–2014⁹ и ГОСТ 30648.2–99¹⁰ соответственно.

Плотность сахаро-жировых смесей и эмульсий определяли отношением их массы к занимаемому объему по методике, разработанной ВНИИ кондитерской промышленности для жидкообразных кондитерских масс. Для проведения измерений использовали штангенциркуль с отсчетом по нониусу 0,1 мм, лабораторный цилиндрический стакан из полимерного материала высотой 40 мм и шпатель из нержавеющей стали размером 20 × 150 мм. Перед проведением анализа измеряли штангенциркулем внутренние диаметр и высоту стакана, записывая результат измерений до целого миллиметра. Объем стакана V (см³) вычисляли по формуле:

$$V = \frac{(\pi \times d^2 / 4) \times h}{1000}, \quad (1)$$

где π — число «пи»; h — внутренняя высота стакана, мм; d — внутренний диаметр цилиндрического стакана, мм; 1000 — коэффициент пересчета из мм³ в см³.

Измерения проводили следующим образом. Пустой стакан взвешивали, записывая результат взвешивания в граммах до второго десятичного знака. В зависимости от этапа исследований стакан наполняли сахаро-жировой смесью или эмульсией, которые брали

непосредственно после приготовления. Стакан наполняли пробой небольшими порциями с периодическим постукиванием дном стакана о поверхность стола так, чтобы проба равномерно заняла весь объем стакана. Выступающую часть пробы удаляли шпателем с выравниванием поверхности по срезу стакана и взвешивали, записывая результат взвешивания в граммах до второго десятичного знака. Время от момента заполнения стакана до взвешивания не превышало 5 мин.

Плотность исследуемого полуфабриката (сахаро-жировых смесей и эмульсий) вычисляли по формуле:

$$\rho = \frac{m_1 - m_2}{V} \times 1000, \quad (2)$$

где ρ — плотность исследуемого полуфабриката, кг/м³; m_1 — масса стакана с исследуемым полуфабрикатом, г; m_2 — масса пустого стакана, г; V — объем стакана, см³; 1000 — коэффициент пересчета из г/см³ в кг/м³.

Эффективную вязкость и напряжения сдвига исследуемых полуфабрикатов (сахаро-жировых смесей и эмульсий) определяли с помощью ротационного вискозиметра «Реотест-2» (Mettingen, Германия). Эффективную вязкость $\eta_{\text{эф}}$, Па·с находили по формуле:

$$\eta_{\text{эф}} = \frac{\tau}{\gamma}, \quad (3),$$

где τ — напряжение сдвига, Па; γ — скорость сдвига, сек⁻¹.

Исследования проводились в трех-пятикратной повторности. Результаты исследований представлены в виде среднего арифметического значения и стандартного отклонения при доверительной вероятности $p \geq 0,95$. Различия средних значений выборок с применением критерия Стьюдента признавались статистически достоверными при доверительной вероятности $p \leq 0,05$. Статистический анализ проводили с использованием программы Microsoft Office Excel.

3. Результаты и обсуждение

При формировании требуемых структурно-механических показателей теста для кексов и готового изделия важным критерием выступает рецептурное соотношение муки пшеничной и пенообразной эмульсии, состоящей из жира, сахара и яйцепродуктов. Следствием сокращения добавленного сахара и жира в изделии закономерно является снижение общего количества эмульсии, формирующей структурный каркас данной пищевой системы. В связи с этим основной задачей работы было обоснование технологически адекватных сырьевых компонентов, обеспечивающих не только сохранение количественного содержания пенообразной эмульсии в тесте и ее стабильности при снижении сахара и жира, но и формирование в данной системе требуемых структурно-механических характеристик.

В качестве составной части пенообразной эмульсии для кексов в работе предложено использование высокодисперсных пищевых порошков — сухих молочных продуктов и сухой молочной сыворотки. Химический состав используемого сырья представлен в Таблице 2.

Таблица 2. Химический состав сухих молочных продуктов и сухой молочной сыворотки

Table 2. Chemical composition of dry milk products and whey powder

Наименование сырья	Массовая доля влаги, %	Содержание жира, %	Содержание белка, %	Содержание лактозы (справочные данные) [26], %
Молоко сухое цельное	3,0 ± 0,1	24,0 ± 0,5	24,0 ± 1	37,2
Молоко сухое обезжиренное	3,2 ± 0,1	1,5 ± 0,01	32,0 ± 1	52,0
Сыворотка сухая молочная	4,5 ± 0,1	1,1 ± 0,01	10,0 ± 0,5	73,5

Содержание лактозы в выбранном сырье в среднем составляет от 37,2 до 73,5 %, что позволяет обоснованно говорить о целесообразности его использования в качестве замены сахара белого в рецептуре изделий для снижения общего количества сахаров, поступающих с сырьем в пищевую систему. Кроме того, известно, что лактоза, содержащаяся в молочных продуктах, является природным сахаром. Использование данных видов сырья для снижения содержания жира в изделии также является актуальным и обоснованным [30,31].

Эмульсия представляет собой аэрированную многофазную дисперсную систему типа масла в воде, содержащую муку, сахар, яйца и микродобавки. Во многих эмульсиях для кексов образующиеся пузырьки воздуха располагаются в жировой, а не в водной фазе [14]. Это относится к биванным мучным кондитерским изделиям с высоким содержанием жира (15–25 % от массы теста), рассматриваемым в данной работе.

³ ГОСТ 32188–2013 «Маргарины. Общие технические условия». М.: Стандартинформ, 2019. — 12 с.

⁴ ГОСТ 31654–2012 «Яйца куриные пищевые. Технические условия». М.: Стандартинформ, 2013. — 7 с.

⁵ ГОСТ 33222–2017 «Сахар белый. Технические условия». М.: Стандартинформ, 2019. — 23 с.

⁶ ГОСТ 28498–90 «Термометры жидкостные стеклянные. Общие технические требования. Методы испытаний». М.: Стандартинформ, 2007. — 10 с.

⁷ ГОСТ 29246–91 «Консервы молочные сухие. Методы определения влаги». М.: Стандартинформ, 2009. — 5 с.

⁸ ГОСТ 29247–91 «Консервы молочные. Методы определения жира». М.: Стандартинформ, 2009. — 5 с.

⁹ ГОСТ 25179–2014 «Молоко и молочные продукты. Методы определения массовой доли белка». М.: Стандартинформ, 2019. — 8 с.

¹⁰ ГОСТ 30648.2–99 «Продукты молочные для детского питания. Методы определения общего белка». Минск: ИПК Издательство стандартов, 1999. — 12 с.

Введение в пищевую систему сухих молочных продуктов и сухой сыворотки осуществлялось на первой стадии получения эмульсии, которая представляет собой предварительное сбивание жирового продукта с сахаром. Трение кристаллов сахара о жир приводит к образованию в системе значительного количества воздушных пузырьков [15], вследствие чего данная стадия является одним из важных этапов в технологии сбивных мучных кондитерских изделий. В контрольном образце соотношение данных видов сырья составляло 1:1. Соотношение сахара, жира и порошкообразных продуктов в исследуемых сахаро-жировых смесях составляло 1:1:0,45 (Рисунок 1).

В работе исследовано влияние вида сухих молочных продуктов и сухой сыворотки на плотность сахаро-жировых смесей в зависимости от температуры используемого жирового продукта и времени сбивания. Результаты исследований представлены на Рисунке 2.

Установлено, что введение сухих молочных продуктов и сухой сыворотки приводило к повышению показателя плотности содержащих их образцов сахаро-жировых смесей во всех временных интервалах сбивания, по сравнению с контрольным образцом, состоящим только из сахара и жира. При температуре жирового продукта $18 \pm 1^\circ\text{C}$ исследуемые смеси с порошкообразным сырьем также различались между собой по показателю плотности, минимальное значение которого достигалось при разном времени сбивания и составляло: для молока сухого цельного и молока сухого обезжиренного — $735 \pm 6,6 \text{ кг/м}^3$ и $800 \pm 7,2 \text{ кг/м}^3$ соответственно на 7 минуте сбивания; для сухой сыворотки — $825 \pm 7,4 \text{ кг/м}^3$ на 9 минуте сбивания. Дальнейшее сбивание увеличивало плотность масс, что свидетельствовало о снижении количества воздушной дисперсной фазы вследствие коалесценции и удаления захваченных пузырьков. В контрольном образце на 7 и 9 минутах сбивания показатели плотности

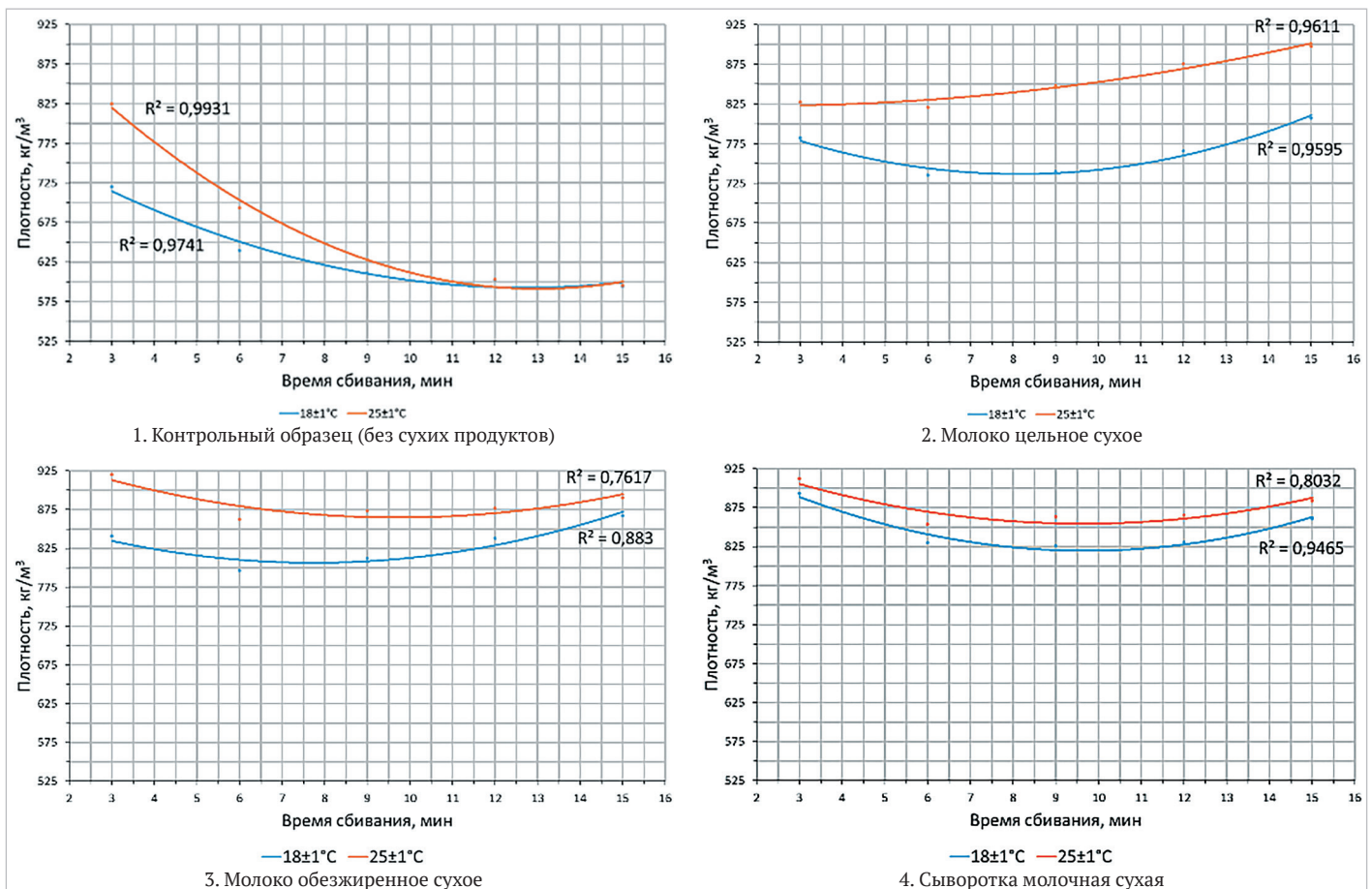
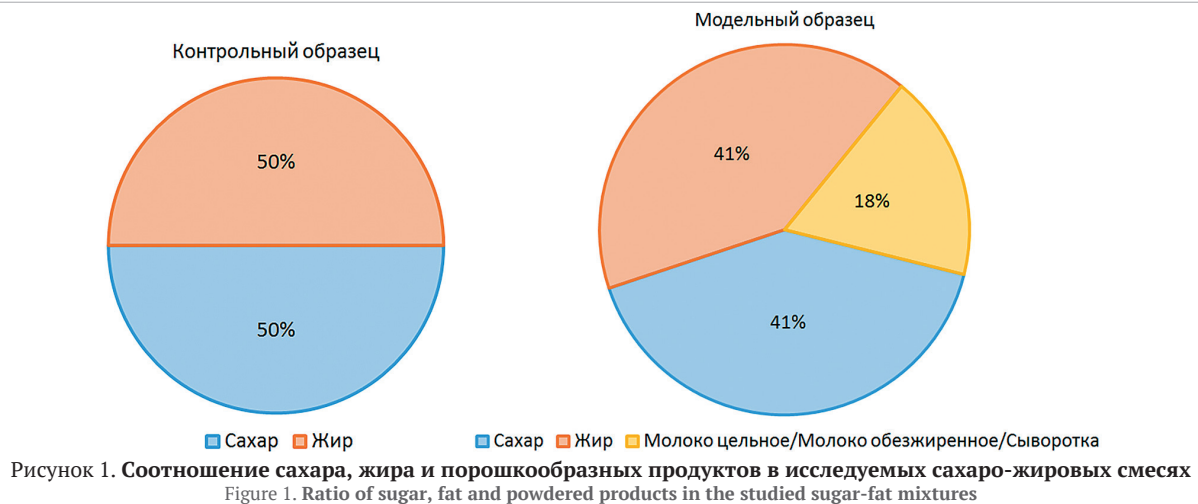


Рисунок 2. Влияние вида порошкообразного сырья на плотность сахаро-жировой смеси в зависимости от температуры и времени сбивания. Данные выражены как среднее значение $\pm \text{SD}$ ($n = 5$), R^2 — величина достоверности аппроксимации.

Figure 2. Effect of the type of powdered raw materials on the density of the sugar-fat mixture depending on temperature and time of whipping. Data are expressed as mean $\pm \text{SD}$ ($n = 5$), R^2 — value of significance of approximation

составляли $640 \pm 5,8$ кг/м³ и $610 \pm 5,5$ кг/м³ соответственно. Разница в плотности исследуемых сред и контрольного образца может быть обусловлена несколькими факторами: в частности, большим содержанием сахара и жира в контрольном образце, а также уменьшением размера частиц дисперсной фазы при введении в массу порошкообразного сырья. Известно, что размер частиц дисперсной фазы оказывает существенное влияние на количество воздуха, попадающего в смесь во время сбивания. Например, сахарный песок (поскольку его кристаллы крупнее) включает в массу больше воздуха, чем сахарная пудра [15].

Наблюдалось также различие в характере зависимостей показателя плотности в смесях с исследуемым сырьем и контрольном образце от времени сбивания. В случае с последним не произошло повышения плотности массы в процессе сбивания в исследуемом интервале времени. Это может быть следствием высокого содержания сахара и жира. Известно, что кристаллы жира обладают способностью адсорбироваться на поверхности пузырьков воздуха, способствуя их стабилизации в дисперсных системах [32]. При температуре жирового продукта 18 ± 1 °C (температура массы 23 ± 1 °C) минимальный показатель плотности в контрольном образце ($590 \pm 5,3$ кг/м³) достигался на 15 минуте сбивания и был ниже такового в образце с сухим цельным молоком (7 минут сбивания) в 1,2 раза; с сухим обезжиренным молоком (7 минут сбивания) и сухой молочной сывороткой (9 минут сбивания) — в 1,4 раза. Повышение температуры жирового продукта до 25 ± 1 °C привело к повышению показателей плотности контрольного образца и исследуемых смесей, свидетельствующему о снижении количества воздушной фазы в массах, по сравнению с массами, полученными при использовании жира с температурой 18 °C. Известно, что на стадии сбивания жира с сахаром пластические свойства жира выступают важным фактором, обуславливающим его способность захватывать и удерживать в системе воздушную фазу [19]. Сделан вывод, что повышение температуры жира приводило к повышению его пластичности и, как следствие, к снижению количества содержащейся в нем кристаллической фракции. В результате этого снижалась способность системы удерживать и стабилизировать воздушную фазу, приводя к увеличению плотности массы. Учитывая вышеизложенное, дальнейшие исследования проводились при использовании жирового продукта с температурой 18 ± 1 °C.

Второй стадией получения эмульсии для сбивных изделий мучной группы является процесс сбивания полученной сахаро-жировой смеси с яйцепродуктами.

На первом этапе этого процесса происходит захват значительного количества газообразной дисперсной фазы за счет пенообразующих свойств яичного белка и присутствия определенного количества кристаллической фракции в жировом продукте. На следующем этапе сбивания происходит диспергирование воздушной фазы внутри системы с образованием эмульгированной пены, обуславливающей формирование губчатой пористой структуры и объема в готовом изделии. Количество и равномерность распределения газообразной дисперсной фазы в эмульсии, а также однородный размер воздушных ячеек являются важными параметрами ее качества и структурных характеристик готового изделия.

Соотношение сырьевых компонентов в пенообразной эмульсии для контрольного и модельного образца представлено на Рисунке 3.

Основной технологической задачей на стадии сбивания сахаро-жировой массы с яйцепродуктами является получение пенообразной системы со стабильными структурными характеристиками, обеспечивающими сохранение максимального количества частиц воздушной фазы при введении муки пшеничной на стадии тестообразования. Под стабильностью пищевых пен понимают их устойчивость к двум основным процессам: утоньшению пленок между пузырьками воздуха, а также разрыву пленок и слипанию пузырьков (коалесценции) под действием различных факторов. В результате протекания данных процессов пищевые среды теряют дисперсность, воздушную фазу и объем [11,33].

В связи с этим на стадии сбивания эмульсии для мучных кондитерских изделий, помимо ее рецептурного состава, важными факторами выступают время и интенсивность механических воздействий, приложенных к системе. С одной стороны, механические воздействия обеспечивают максимально возможное диспергирование в эмульсии захваченного воздуха, а с другой — способствуют формированию оптимальной толщины пленок между частицами воздушной фазы, которые удерживают воздух внутри системы. Толщина пленок, в свою очередь, будет находиться в зависимости от структурных свойств дисперсионной среды, в частности, вязкости и предельного напряжения сдвига [34].

В работе изучено влияние порошкообразного сырья на реологические характеристики пенообразной эмульсии (t эмульсии = 22 ± 1 °C). Исследована зависимость эффективной вязкости образцов от скорости сдвига, отражающая в том числе структурную устойчивость полученных эмульсий к разрушению при приложении внешних механических воздействий. Результаты исследований представлены на Рисунке 4.

Кривые вязкости для всех исследуемых образцов эмульсий носили нелинейный характер и являлись неньютоновскими жидкостями. При минимальных скоростях сдвига образцы обладали максимальной вязкостью практически неразрушенной структуры, значения которой снижались по мере увеличения скорости. Установлено, что добавление сухих молочных продуктов и сухой молочной сыворотки привело к увеличению вязкости изучаемых систем. Показатели максимальной вязкости неразрушенной структуры составили для контрольного образца эмульсии $36,1 \pm 1,8$ Па·с, эмульсии с сухим цельным молоком — $162,8 \pm 8,1$ Па·с, с молоком сухим обезжиренным $135,5 \pm 6,8$ Па·с, с сывороткой молочной сухой — $108,4 \pm 5,4$ Па·с. При минимальной скорости сдвига эффективная вязкость эмульсий была выше контрольного образца при использовании сухого цельного молока в 4,5 раза, сухого обезжиренного молока — в 3,8 раза, сухой молочной сыворотки — в 3 раза. Максимальную тенденцию к образованию прочной структуры демонстрировал образец с молоком цельным сухим. Увеличение вязкости эмульсий при добавлении сухих порошкообразных продуктов может быть обусловлено в том числе новыми свойствами дисперсионной среды.

Установлено, что исследуемые эмульсии обладали низкой структурной прочностью, поскольку основное снижение вязкости происходило при низких скоростях сдвига. При увеличении скорости сдвига от 1 сек^{-1} до 3 сек^{-1} вязкость контрольного образца эмульсии снизилась в 5 раз, эмульсии с сухим цельным молоком — в 7 раз, эмульсий с сухим обезжиренным молоком и сывороткой — в 6,5 раза. В контрольном образце эмульсии вязкость снизилась от $36,1 \pm 1,8$ Па·с до $7,0 \pm 0,4$ Па·с; в образце эмульсии с молоком сухим цельным —

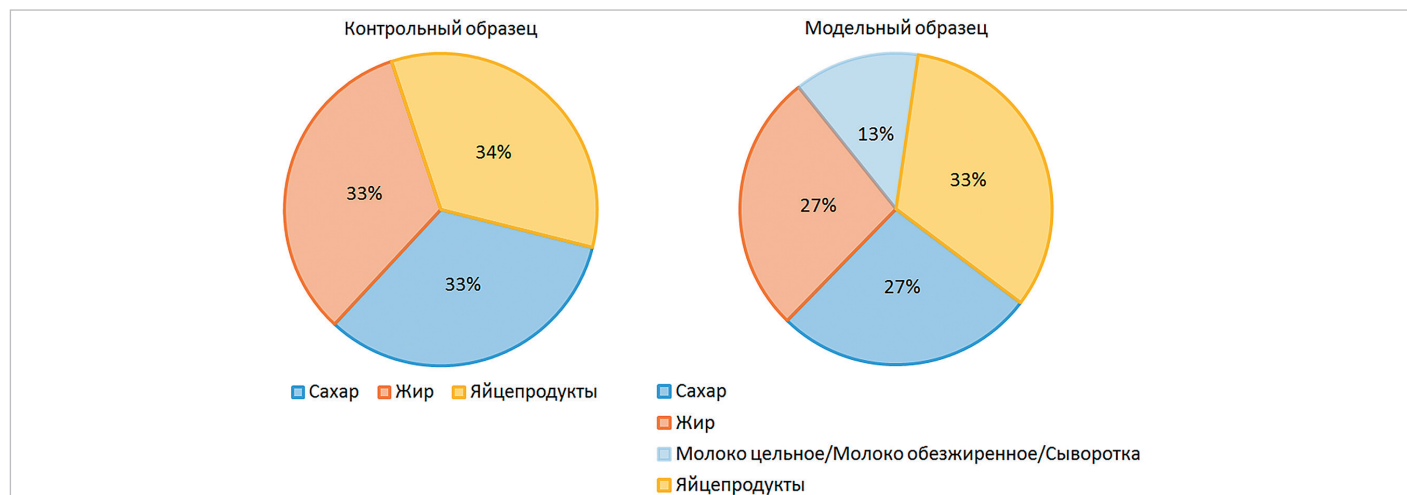


Рисунок 3. Соотношение сырьевых компонентов в пенообразной эмульсии
Figure 3. Ratio of the raw material components in the foam-like emulsion

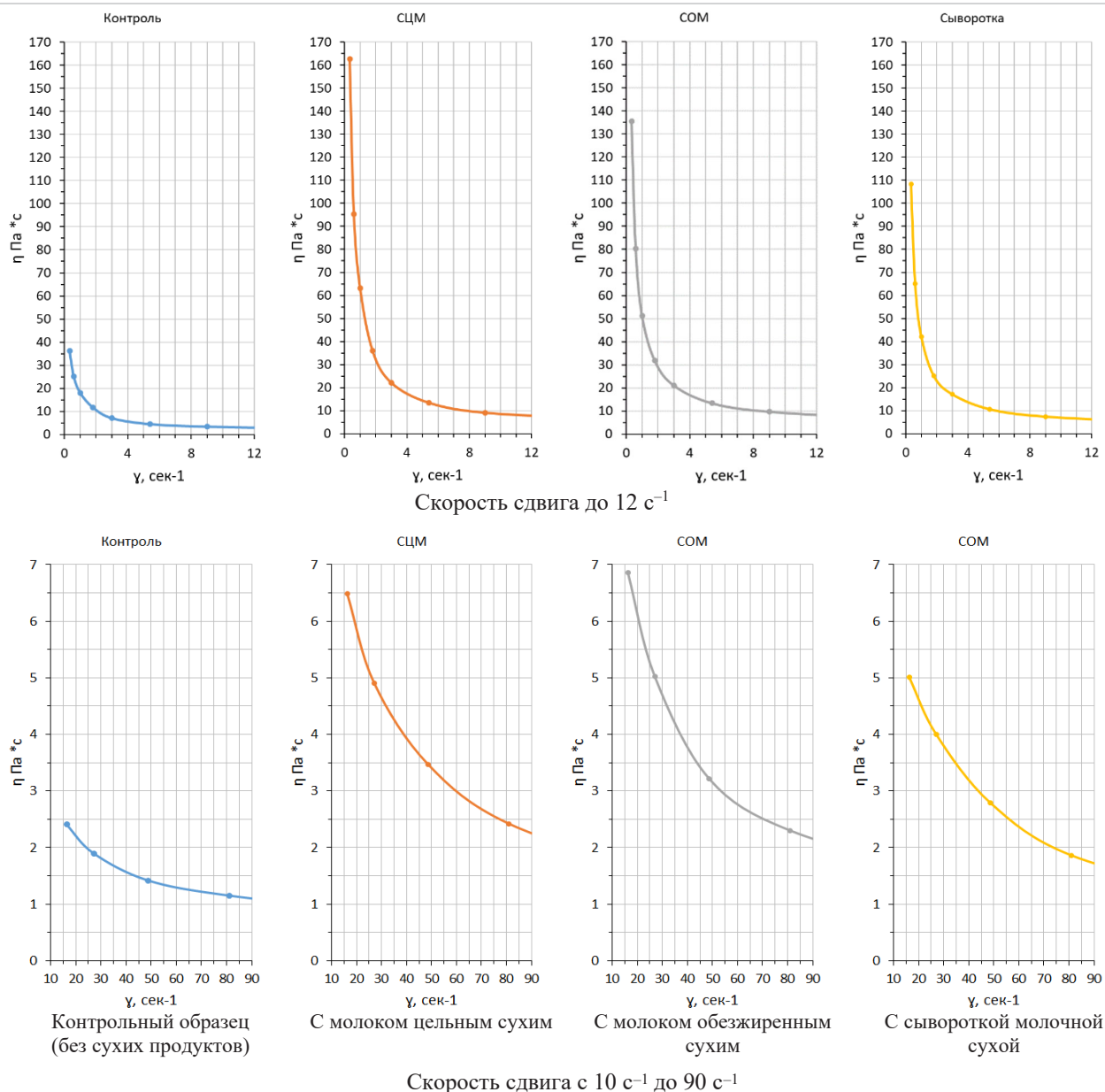


Рисунок 4. Зависимость эффективной вязкости образцов эмульсии от скорости сдвига. Данные выражены как среднее значение \pm SD ($n = 3$)

Figure 4. Dependence of effective viscosity of the emulsion samples on the shear rate. Data are expressed as mean \pm SD ($n = 3$)

от $162,6 \pm 8,1$ Па·с до $22,0 \pm 1,1$ Па·с; в образце эмульсии с молоком сухим обезжиренным — от $135,5 \pm 6,8$ Па·с до $21,0 \pm 1,1$ Па·с; в образце с сывороткой — от $108,4 \pm 5,4$ Па·с до $17,1 \pm 0,9$ Па·с. При увеличении скорости сдвига от 27 сек^{-1} до 81 сек^{-1} вязкость всех исследуемых эмульсий снизилась в среднем в 2 раза: для контрольного образца — с $2,4 \pm 0,1$ Па·с до $1,2 \pm 0,1$ Па·с; для образца с молоком цельным сухим — с $4,9 \pm 0,2$ Па·с до $2,4 \pm 0,1$ Па·с; с молоком сухим обезжиренным — с $4,8 \pm 0,2$ Па·с до $2,3 \pm 0,1$ Па·с; с сывороткой молочной сухой — с $3,8 \pm 0,2$ Па·с до $1,9 \pm 0,1$ Па·с. Свойство дисперсных систем к снижению показателей их эффективной вязкости при увеличении скорости сдвига объясняют ориентацией частиц в направлении течения под действием возрастающих сдвигающих сил, в то время как в неподвижной среде расположение частиц характеризуется значительной хаотичностью, обусловленной броуновским движением. С повышением скорости также уменьшается взаимодействие между частицами [35,36].

Известно, что важным свойством пенообразных структур является межфазная вязкость, действующая в межфазных областях дисперсии и способствующая стабильности пены посредством замедления скорости сближения пузырьков воздуха. Высокая межфазная вязкость в системе значительно замедляет процесс утоньшения и вытеснения пленок и, вероятно, создает вязкоупругий барьер для коалесценции [37,38]. Следовательно, можно предположить, что высокая вязкость пенообразной эмульсии с молоком цельным сухим

будет способствовать увеличению межфазной вязкости и, как следствие, придавать исследуемой системе большую устойчивость к разрушению вследствие изменения концентрации воздушной фазы.

С повышением концентрации растворенного вещества происходит увеличение вязкости среды, а также изменяется характер ее течения, что оказывает существенное влияние на технологические параметры обработки пищевых сред. Течение материалов зависит от его физико-химических особенностей: от формы и расположения молекул, концентрации полимера, температуры, массовой доли влаги. О течении материала можно судить по непрерывному и неограниченному увеличению его деформации под действием внешних сил [36].

Полученные в результате исследований экспериментальные значения скоростей сдвига и напряжений сдвига показали, что течение исследуемых образцов пенообразных эмульсий с достаточной величиной достоверности аппроксимации (R^2) может быть описано реологическим уравнением Гершеля–Балкли:

$$\tau = \tau_0 + K\dot{\gamma}^n; \text{ (функция вязкости } \eta_{\text{эф}} = \tau/\dot{\gamma}) \quad (4)$$

где τ_0 — предел текучести, Па; K — коэффициент консистенции; $\dot{\gamma}$ — градиент скорости, сек^{-1} ; n — индекс течения по Гершелю–Балкли; $\eta_{\text{эф}}$ — эффективная вязкость.

Реологические уравнения течения для всех исследуемых пенообразных эмульсий представлены в Таблице 3.

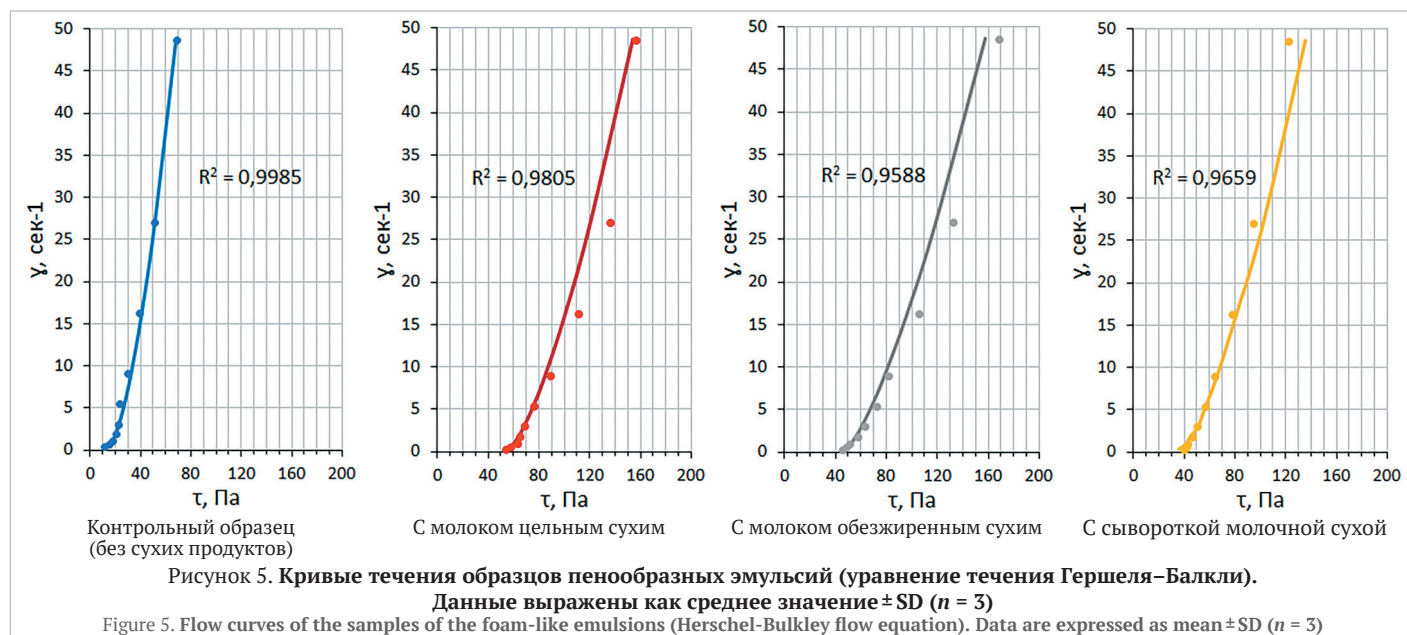


Таблица 3. Реологические уравнения течения пенообразных эмульсий

Table 3. Rheological equations of the flow of the foam-like emulsions

Образец эмульсии	τ , Па	R^2
Контроль	$\tau = 12,44 + 5,0769\gamma^{0,6171}$	0,9985
С сухим цельным молоком	$\tau = 54,53 + 6,7952\gamma^{0,6923}$	0,9805
С сухим обезжиренным молоком	$\tau = 45,42 + 6,7292\gamma^{0,7253}$	0,9588
С сухой молочной сывороткой	$\tau = 37,11 + 6,0298\gamma^{0,6825}$	0,9659

Структурная прочность эмульсий подтверждалась наличием двух критических значений предельного напряжения сдвига: условного статического и динамического пределов текучести, определенных по реологическим кривым течения (Рисунок 5).

Значения показателей критических напряжений сдвига зависели от вида используемого порошкообразного сырья. Наибольший статический предел текучести имел образец эмульсии с молоком цельным сухим ($54,5 \pm 2,7$ Па), что превышало величину данного показателя в контрольном образце ($12,4 \pm 0,6$ Па) в 4,5 раза. Далее в порядке убывания значений показателя следовали эмульсии: с молоком сухим обезжиренным ($45,4 \pm 2,3$ Па) > с сывороткой молочной сухой ($37,1 \pm 1,9$ Па). Наибольшим динамическим пределом текучести также характеризовался образец эмульсии с молоком цельным сухим ($67,6 \pm 3,4$ Па), что превышало величину данного показателя в контрольном образце ($22,4 \pm 1,1$ Па) в 3 раза. Далее в порядке убывания значений показателя следовали эмульсии: с молоком сухим обезжиренным ($63,1 \pm 3,2$ Па) > с сывороткой молочной сухой ($50,1 \pm 2,5$ Па).

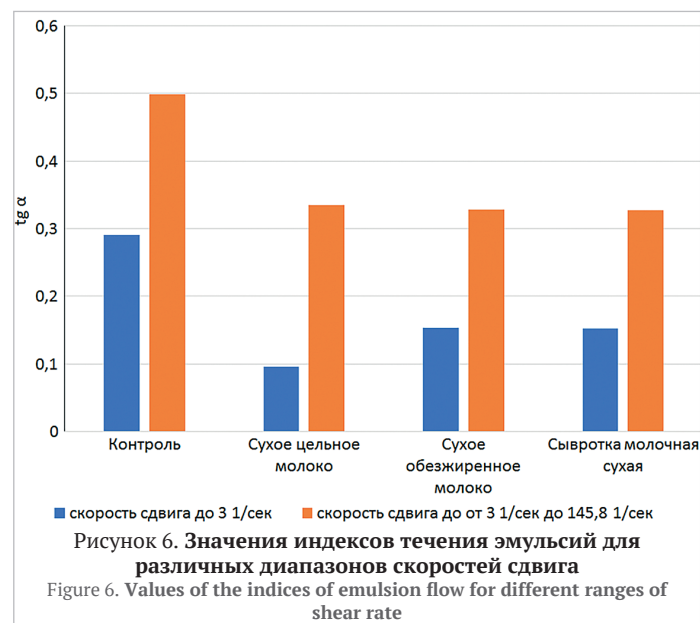
Сделан вывод, что введение исследуемого порошкообразного сырья приводило к изменению характера течения образцов пенообразных эмульсий. Происходило формирование систем с более прочными структурными свойствами, для перевода которых из области упругих в область пластических деформаций требовалось приложение больших механических воздействий, по сравнению с контрольным образцом. При этом необходимо отметить, что процесс обработки пенообразных масс следует вести при значениях ниже динамического предела текучести, обеспечивая сохранение структурной целостности обрабатываемых масс.

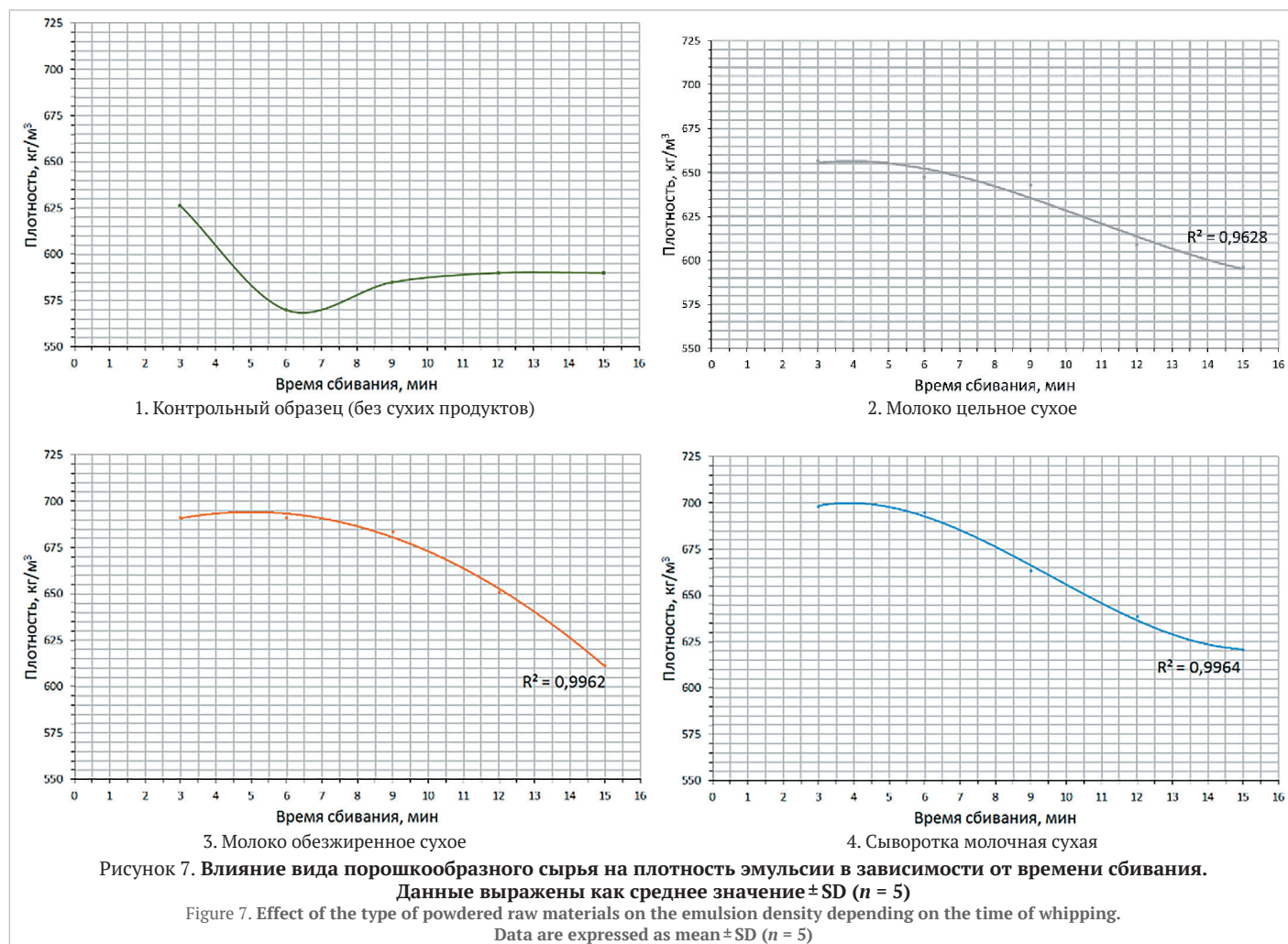
Для всех образцов эмульсий с порошкообразным сырьем кривые течения в логарифмических координатах аппроксимировались двумя прямыми в диапазонах скоростей сдвига: $0-3 \text{ сек}^{-1}$ и $3-145,8 \text{ сек}^{-1}$. Они имели разный тангенс угла наклона к оси абсцисс, характеризующий степень разжижения материала, которая выражается индексом течения (уровнем отклонения жидкости от ньютоновского течения). Полученные значения показателей для исследуемых сред представлены на Рисунок 6.

Тангенс угла наклона всех прямых был меньше в диапазоне низких скоростей сдвига, что отражает большее разрушение структуры систем в этой области. В области низких скоростей максимальное разжижение при сдвиге демонстрировал образец эмульсии с молоком цельным сухим; минимальным разжижением характеризовался контрольный образец.

Плотность является важным физическим параметром пищевых пен. В общей характеристике масс данного вида низкая плотность свидетельствует о высоком количественном содержании воздушной дисперсной фазы, захваченной и удержанной системой на стадии ее получения. В работе исследовано влияние вида сухих молочных продуктов и сухой сыворотки на плотность эмульсии в зависимости от времени сбивания. Результаты исследований представлены на Рисунок 7.

Установлено, что контрольный образец эмульсии отличался от исследуемых образцов с порошкообразными продуктами характером формирования структуры (Рисунок 7.1). На первой стадии сбивания (до 6-й минуты) в контрольной пенообразной массе происходило образование максимального количества воздушной фазы, сопровождающееся достижением минимального значения показателя ее плотности ($570 \pm 5,1 \text{ кг/м}^3$). Дальнейшее сбивание в интервале 6–9 минут приводило к некоторому повышению показателя плотности массы (до $590 \pm 5,3 \text{ кг/м}^3$), значение которого не изменялось до 15 минут сбивания. Известно, что стабильность дисперсных систем характеризуется способностью дисперсной фазы сохранять во времени постоянство дисперсности частиц и состояние равномерного распределения их во всем объеме дисперсионной среды. В случае с пенообразными структурами стабильность дисперсных систем также характеризуется постоянством количества дисперсной воздушной фазы. В связи с этим сделан вывод, что на первом этапе сбивания система в контрольном образце обладала неустойчивой структурой, в том числе вследствие недостаточно сформировавшихся





межфазных слоев. В связи с этим при дальнейшем диспергировании и распределении воздушной фазы внутри системы происходила потеря ее части.

Процесс формирования пенообразной структуры эмульсии в образцах с порошкообразным сырьем происходил постепенно на протяжении всего процесса сбивания. Минимальное значение показателя плотности эмульсии во всех образцах достигалось в конце технологического процесса и составляло: для образца с сухим цельным молоком — $600 \pm 5,4$ кг/м³, для образца с сухим обезжиренным молоком — $610 \pm 5,5$ кг/м³, для образца с сухой молочной сывороткой — $620 \pm 5,6$ кг/м³. Повышение плотности в образцах эмульсии с сухим обезжиренным молоком и сухой молочной сывороткой может быть следствием высокого содержания лактозы, которая обладает высокой влагоудерживающей способностью и повышает стабильность пены за счет минимизации стекания жидкости и слипания воздушных пузырьков.

Несмотря на то, что показатели плотности эмульсий с порошкообразным сырьем были несколько выше этого показателя в контрольном образце (максимально на 5% в образце с сухой молочной сывороткой), можно сделать вывод, что на данной технологической стадии достигнуто максимальное приближение характеристик эмульсий с исследуемым сырьем к контрольному образцу.

4. Выводы

Сокращение количества добавленного сахара, жира в рационах питания является стратегически важным шагом для снижения риска алиментарно-зависимых заболеваний и повышения качества жизни населения Российской Федерации. В работе для снижения содержания добавленного сахара и жира в кексах показана возмож-

ность использования сухих молочных продуктов и сухой молочной сыворотки. Направлением исследований являлось изучение качественных и реологических характеристик пенообразных эмульсий для кексов. Установлено влияние модификации состава на реологические показатели эмульсий, определяющие поведение пищевых масс при технологической обработке. Эффективная вязкость сред возрастала по сравнению с контрольным образцом, что обусловлено, в частности, новыми свойствами дисперсионной среды. Максимальное значение показателя демонстрировал образец с молоком сухим цельным. При этом все образцы пенообразных эмульсий, наряду с контрольным образцом, обладали низкой структурной прочностью и при приложении низких механических воздействий демонстрировали значительное разрушение, свойственное данному типу структур. Наблюдалось изменение характера течения исследуемых сред при введении указанного сырья вследствие формирования структур с новыми структурными свойствами. Установлено, что для описания характера течения эмульсий с высокой величиной достоверности аппроксимации может быть использовано реологическое уравнение Гершеля–Балкли. Показатели плотности у всех исследуемых эмульсий превышали значение контрольного образца незначительно, что является свидетельством получения новых пищевых систем с достаточным уровнем структурообразующей дисперсной воздушной фазы. Результаты исследований позволили установить, что использование сухих молочных продуктов и сухой молочной сыворотки в исследуемых количествах является одним из путей моделирования рецептурного состава кексов с учетом принципов здорового питания, а также обеспечивает формирование оптимальных характеристик пенообразных эмульсий, свойства которых лежат в основе качества готовых изделий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / REFERENCES

- Gassner, L., Zechmeister-Koss, I., Reinsperger, I. (2022). National strategies for preventing and managing non-communicable diseases in selected countries. *Frontiers in Public Health*, 10, Article 838051. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2022.838051>
- Maffei, C., Olivieri, F., Valerio, G., Verduci, E., Licenziati, M. R., Calcaterra, V. et al. (2023). The treatment of obesity in children and adolescents: Consensus position statement of the Italian society of pediatric endocrinology and diabetology, Italian Society of Pediatrics and Italian Society of Pediatric Surgery. *Italian Journal of Pediatrics*, 49(1), Article 69. <https://doi.org/10.1186/s13052-023-01458-z>
- Мистенева, С. Ю. (2022). Продукты переработки цельного зерна и перспективы их использования при производстве мучных кондитерских изделий. *Пищевые системы*, 5(3), 249–260. [Misteneva, S. Yu. (2022). Products of whole grain processing and prospects of their use in production of flour confectionery. *Food Systems*, 5(3), 249–260. (In Russian)] <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2022-5-3-249-260>
- Ranasinghe, M., Stathopoulos, C., Sundarakani, B., Maqsood, S. (2024). Valorizing date seeds through ultrasonication to enhance quality attributes of dough and biscuit, Part-1: Effects on dough rheology and physical properties of biscuits. *Ultrasonics Sonochemistry*, 109, Article 107015. <https://doi.org/10.1016/j.ultrsonch.2024.107015>
- Marzec, A., Kowalska, J., Domian, E., Galus, S., Ciurzyńska, A., Kowalska, H. (2021). Characteristics of dough rheology and the structural, mechanical, and sensory properties of sponge cakes with sweeteners. *Molecules*, 26(21), Article 6638. <https://doi.org/10.3390/molecules26216638>
- Neji, C., Semwal, J., Máthé, E., Sipos, P. (2023). Dough rheological properties and macronutrient bioavailability of cereal products fortified through legume proteins. *Processes*, 11(2), Article 417. <https://doi.org/10.3390/pr11020417>
- Martínez-Padilla, L. P. (2025). Rheology of liquid foods under shear flow conditions: Recently used models. *Journal of Textures Studies*, 55(1), Article e12802. <https://doi.org/10.1111/jtxs.12802>
- Sofou, S., Muliawan, E. B., Hatzikiriakos, S.G., Mitsoulis, E. (2008). Rheological characterization and constitutive modeling of bread dough. *Rheologica Acta*, 47, 369–381. <https://doi.org/10.1007/s00397-007-0248-x>
- RB-STR.RU (2021). Рынок кексов: развитие сладкого сегмента. Электронный ресурс: <https://rb-str.ru/politika/rynok-keksov-razvitiye-sladkogo-segmenta/?ysclid=lu9fl76xii714564013>. Дата обращения: 21.03.2025. [Muffins Market: Development of the Sweet Segment. (2021). Retrieved from <https://rb-str.ru/politika/rynok-keksov-razvitiye-sladkogo-segmenta/?ysclid=lu9fl76xii714564013>. Accessed March 21, 2025 (In Russian)]
- Koksel, F., Arliton, S., Anatoliy Strybulevych, A., Page, J. H., Scanlon, M. G. (2016). The bubble size distribution and its evolution in non-yeasted wheat flour doughs investigated by synchrotron X-ray microtomography. *Food Research International*, 80, 12–18. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2015.12.005>
- Schramm, L. (2014). Emulsions, Foams, Suspensions, and Aerosols. Microscience and Applications. Wiley-VCH Verlag GmbH and Co.KGaA, 2014. <https://doi.org/10.1002/9783527679478>
- Zhao, T., Zhang, X., Chen Y., Jing, L., Bao, Z. (2024). Study on the relationship between surface tension and dilational visco-elasticity with foam stability. *Journal of Surfactants and Detergents*, 28(3), 411–421. <https://doi.org/10.1002/jsde.12801>
- Csurka, T., Varga-Tóth, A., Kühn, D., Hitka, G., Badak-Kerti, K., Alpár, B. et al. (2022). Comparison of techno-functional and sensory properties of sponge cakes made with egg powder and different quality of powdered blood products for substituting egg allergen and developing functional food. *Frontiers in Nutrition*, 9, Article 979594. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.979594>
- Tadros, F. T. (2014). Formulation of disperse systems. Science and Technology. Wiley-VCH, 2014. <https://doi.org/10.1002/9783527678297>
- O'Sullivan, M. G. (2020). Salt, Fat and Sugar reduction. Sensory Approaches for Nutritional Reformulation of Foods and Beverages. Woodhead Publishing Ltd, 2020.
- Vassiliou, R., Viren, R. (2019). Reformulation as a Strategy for Developing Healthier Food Products. Challenges, Recent Developments and Future Prospects. Springer, 2019. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-23621-2>
- Tadros, T. F. (2018). Formulation Science and Technology. Volume 4: Agrochemicals, Paints and Coatings and Food Colloids. Walter de Gruyter GmbH, 2018.
- O'Brien, R. (2008). Fats and oils. Formulating and processing for applications. CRC Press, 2008. <https://doi.org/10.1201/9781420061673>
- Rajah, K. K. (2014). Fats in food technology. Wiley Blackwell, 2014.
- Janssen, F., Wouters, A. G. B., Linclau, L., Waelkens, E., Derua, R., Dehairs, J. et al. (2020). The role of lipids in determining the air-water interfacial properties of wheat, rye, and oat dough liquor constituents. *Food Chemistry*, 319, Article 126565. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.126565>
- Xiao, B., Liu, T., Wang D., Tang, L., Zhou, L., Gou, S. (2025). Another possible rationale for foam stability: The quantity and strength of hydrogen bonds at the gas-liquid interface. *The Journal of Physical Chemistry B*, 129(11), 3083–3093. <http://doi.org/10.1021/acs.jpcc.4c08131>
- Ho, T. M., Tanzil, A., Bhandari, B. R., Bansal, N. (2023). Effect of surfactant type on foaming properties of milk. *Food Bioprocess Technology*, 16, 1781–1793. <https://doi.org/10.1007/s11947-023-03012-5>
- Xiong, X., Ho, M. T., Bhandari, B., Bansal, N. (2020). Foaming properties of milk protein dispersions at different protein content and casein to whey protein ratios. *International Dairy Journal*, 109, Article 104758. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2020.104758>
- Ho, T. M., Bhandari, B. R., Bansal, N. (2022). Functionality of bovine milk proteins and other factors in foaming properties of milk: A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 62(17), 4800–4820. <https://doi.org/10.1080/10408398.2021.1879002>
- Zhang, S., Cheng, J., Xie, Q., Jiang, S., Sun, Y. (2022). Foaming and physicochemical properties of commercial protein ingredients used for infant formula formulation. *Foods*, 11(22), Article 3710. <https://doi.org/10.3390/foods11223710>
- McSweeney, P. L., McNamara, J. P. (2022). Encyclopedia of dairy sciences. Third edition: Elsevier Inc., 2022.
- Ho, T. M., Xiong, X., Bhandari, B. R., Bansal, N. (2024). Foaming properties and foam structure of milk determined by its protein content and protein to fat ratio. *Food Bioprocess Technology*, 17, 4665–4678. <https://doi.org/10.1007/s11947-024-03407-y>
- Ramesh, C., Chandan, A. K. (2008). Dairy Processing and Quality Assurance. Wiley, 2008.
- Сборник ВНИИ кондитерской промышленности «Технологические инструкции по производству мучных кондитерских изделий». (1992). М. Астра-сем, 2009. [Collection of the All-Russian Scientific Research Institute of Confectionery Industry “Technological instructions on production of flour confectionery”. Moscow: Astra-sem, 2009. (In Russian)]
- Swan, G. E., Powell, N. A., Knowles, B. L., Bush, M. T., Levy, L. B. (2018). A definition of free sugars for the UK. *Public Health Nutrition*, 21(9), 1636–1638. <https://doi.org/10.1017/S136898001800085X>
- WHO (World Health Organization) (2022). Sugars Factsheet. Retrieved from <https://cdn.who.int/media/docs/libraries/provider2/euro-health-topics/obesity/sugars-factsheet.pdf>. Accessed March 21, 2025
- Brooker, B. E. (1993). The stabilization of fir in cake batters — The role of fat. *Food Structure*, 12(3), Article 2.
- Eserowa, D., Gochev, G., Platikanov, D. et al. (2019). Foam Films and Foams. Fundamentals and Applications: CRC Press, 2019. <https://doi.org/10.1201/9781351117746>
- Bashir, A., Haddad, A. S., Rafati R. (2022). An experimental investigation of dynamic viscosity of foam at different temperatures. *Chemical Engineering Science*, 248(Part B), Article 117262. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2021.117262>
- Bezelgues, J.-B., Serieye, S., Crosset-Perrotin, L., Leser, M. E. (2008). Interfacial and foaming properties of some food grade low molecular weight surfactants. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 331(1–2), 56–62. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2008.07.022>
- Hollenbach, R., Völpl, A. R., Höfert, L., Rudat, J., Ochsenreither, K., Willenbacher, N., Syldatk, C. (2020). Interfacial and foaming properties of tailor-made glycolipids — influence of the hydrophilic head group and functional groups in the hydrophobic tail. *Molecules*, 25(17), Article 3797. <https://doi.org/10.3390/molecules25173797>
- Moradpour, N., Yang, J., Tsai, P. A. (2024). Liquid foam: Fundamentals, rheology, and applications of foam displacement in porous structures, *Current Opinion in Colloid and Interface Science*, 74, Article 101845. <https://doi.org/10.1016/j.cocis.2024.101845>
- Luo, H., Jia, Y., Lu, Y., Wen, J., Luo, Y., Wang, C. et al. (2025). Progress on emulsification, viscosity, phase inversion characteristics, and prediction methods of crude oil-water mixed system. *ACS Omega*, 10(42), 49321–49334. <https://doi.org/10.1021/acsomega.5c05760>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ	AUTHOR INFORMATION
Принадлежность к организации	Affiliation
Мистенева Светлана Юрьевна — кандидат технических наук, научный сотрудник, лаборатория мучных кондитерских изделий, Всероссийский научно-исследовательский институт кондитерской промышленности 107023, Москва, ул. Электrozаводская, 20 стр. 3 E-mail: s.misteneva@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1439-7972	Svetlana Yu. Misteneva, Candidate of Technical Science, Researcher, Laboratory of flour confectionery, All-Russian Scientific Research Institute of Confectionery Industry 20/3, Elektrozavodskaya Str., Moscow, 107023, Russia E-mail: s.misteneva@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1439-7972
Критерии авторства	Contribution
Автор самостоятельно подготовил рукопись и несет ответственность за плагиат.	Author completely prepared the manuscript and is responsible for plagiarism.
Конфликт интересов	Conflict of interest
Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.	The author declares no conflict of interest.

DOI: <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-4-515-523>

Поступила 27.06.2025

Поступила после рецензирования 03.11.2025

Принята в печать 17.11.2025

© Березина Е. А., Кийски В. Д., Казанкин Н. А., Кригер О. В., Яковченко Н. В., 2025

<https://www.fsjour.com/jour>

Обзорная статья

Открытый доступ

БИОЛОГИЧЕСКИ АКТИВНЫЕ ВЕЩЕСТВА РАСТИТЕЛЬНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ: МЕТОДЫ ВЫДЕЛЕНИЯ И АНАЛИЗА

Березина Е. А., Кийски В. Д., Казанкин Н. А.*, Кригер О. В., Яковченко Н. В.

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: АННОТАЦИЯ

биологически активные вещества, методы выделения БАВ, методы анализа БАВ, экстракция, растительное сырье, антиоксиданты

Биологически активные вещества (БАВ) растительного происхождения играют ключевую роль в разработке функциональных продуктов питания, биодобавок и лекарственных средств, однако их применение ограничено сложностями выделения и низкой стабильностью. Данная статья посвящена исследованию структуры, характеристик и биологического воздействия основных классов БАВ — фенольных соединений, среди которых выделяются флавоноиды, стильбены и лигнаны. Подчеркивается их роль как мощных антиоксидантов и противовоспалительных агентов, а также их влияние на здоровье сердечно-сосудистой системы. Обзор охватывает как традиционные, так и современные способы выделения биоактивных компонентов из растений, такие как мацерация, дистилляция, экстракция методом Сокслета, ультразвуковые, микроволновые и сверхкритические технологии экстрагирования. Подробно освещены спектрофотометрические методики DPPH, ABTS, а также флуоресцентная методика ORAC и ее улучшенная версия ORAC-SIA, предназначенные для оценки общей антиоксидантной способности индивидуальных соединений и их комбинаций при физиологически релевантных значениях кислотности среды. Результаты исследования демонстрируют зависимость выхода БАВ от типа растворителя, гидромодуля и степени измельчения сырья. Параметры экстракции, такие как температура, давление и pH, существенно влияют на сохранность термолabile соединений. Установлено, что модификация структуры циклотидов увеличивает биодоступность пептидных препаратов в 1,5–2 раза. Аналитические методы, такие как ORAC и его модификация ORAC-SIA, позволяют оценивать антиоксидантную активность БАВ в сложных смесях, включая пищевые продукты. На основании проведенного анализа сформулированы выводы о необходимости оптимизации «зеленых» методов экстракции, разработки стандартизированных протоколов анализа и углубленного изучения взаимосвязи «структура–активность» для направленного дизайна БАВ.

Received 27.06.2025

Accepted in revised 03.11.2025

Accepted for publication 17.11.2025

© Berezina E. A., Kiiski V. D., Kazankin N. A., Kriger O. V., Iakovchenko N. V., 2025

Available online at <https://www.fsjour.com/jour>

Review article

Open access

BIOLOGICALLY ACTIVE SUBSTANCES OF PLANT ORIGIN: METHODS OF EXTRACTION AND ANALYSIS

Elizaveta A. Berezina, Vitalina D. Kiiski, Nikita A. Kazankin*, Olga V. Kriger, Natalia V. Iakovchenko

ITMO University, Saint Petersburg, Russia

KEYWORDS:

biologically active substances, methods of BAS isolation, methods of BAS analysis, extraction, plant raw materials, antioxidants

ABSTRACT

Biologically active substances (BAS) of plant origin play a key role in the development of functional foods, bio-additives and medicines. Their use, however, is restricted by difficulties in extraction and low stability. This paper is devoted to investigation of the structure, characteristics and biological impact of the main BAS classes — phenolic compounds, among which flavonoids, stilbenes and lignans stand out. Their role as potent antioxidants and anti-inflammatory agents, as well as their effect on the health of the cardiovascular system, is emphasized. The review covers both traditional and modern methods for extraction of biologically active components from plants, such as maceration, distillation, extraction by the Soxhlet method, ultrasound, microwave and supercritical technologies of extraction. The authors describe in detail spectrophotometric methods DPPH, ABTS, as well as fluorescent method ORAC and its improved version ORAC-SIA, intended for the assessment of the total antioxidant capacity of individual compounds and their combination upon the physiologically relevant values of the acidity of the environment. The results of the study demonstrate the dependency of the BAS yield on the solvent type, hydromodule and a degree of comminution of raw materials. Extraction parameters such as temperature, pressure and pH significantly affect the preservation of thermolabile compounds. It has been found that modification of the structure of cyclotides increases the bioavailability of peptide preparations by 1.5–2 times. Analytical methods like ORAC and its modification ORAC-SIA allows for assessing the antioxidant activity of BAS in complex mixtures including food products. Based on the performed analysis, the conclusions were made regarding the need for optimization of “green” extraction methods, development of the standardized protocols of analysis and in-depth study of the interrelation “structure–activity” for targeted design of BAS.

1. Введение

Биологически активные вещества (БАВ) растительного происхождения играют ключевую роль в современных исследованиях, посвященных разработке функциональных пищевых продуктов, биологически активных добавок и лекарственных препаратов. Эти соединения обладают антиоксидантной, противовоспалительной, антимикробной активностью и другими полезными для организма человека физиологическими свойствами [1]. Среди наиболее изученных групп БАВ выделяют фенольные соединения, флавоноиды,

алкалоиды, терпены и циклические пептиды, которые все чаще становятся объектом интереса в области пищевой биотехнологии и химии пищи [2]. Развитие современных методов аналитической химии и биотехнологии позволило значительно продвинуться в изучении способов выделения, очистки, идентификации и модификации структуры БАВ с целью повышения их функциональной активности и стабильности в условиях пищевых систем [3]. Такие подходы открывают возможности для создания новых ингредиентов с заданными свойствами, что особенно важно при разработке продуктов пита-

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Березина, Е. А., Кийски, В. Д., Казанкин, Н. А., Кригер, О. В., Яковченко, Н. В. (2025). Биологически активные вещества растительного происхождения: методы выделения и анализа. *Пищевые системы*, 8(4), 515–523. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-4-515-523>

FOR CITATION: Berezina, E. A., Kiiski, V. D., Kazankin, N. A., Kriger, O. V., Iakovchenko, N. V. (2025). Biologically active substances of plant origin: Methods of extraction and analysis. *Food Systems*, 8(4), 515–523. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-4-515-523>

ния специального назначения, включая функциональные продукты, спортивное питание и диетические добавки [4].

Особое внимание уделяется использованию безопасных, разрешенных к применению в пищевой промышленности растворителей (этанола, воды, этилацетата), а также экстракции с помощью ультразвука, микроволнового излучения и сверхкритического CO₂, что позволяет минимизировать токсикологические риски и соответствовать требованиям международных стандартов безопасности пищевых продуктов. Одним из перспективных направлений является молекулярная пептидная трансплантация — метод, позволяющий встраивать биоактивные последовательности в устойчивые каркасы, такие как циклотиды, обеспечивая этим повышенную стабильность и биодоступность получаемых соединений [5]. С учетом стремительного развития технологий переработки растительного сырья и роста потребительского интереса к натуральным функциональным продуктам, актуальность исследований, направленных на оптимизацию выделения и анализа БАВ, неуклонно возрастает. Целью данного обзора является систематический анализ современных методов выделения, анализа и модификации биологически активных веществ растительного происхождения, включая фенольные соединения, флавоноиды, алкалоиды и циклические пептиды. Особое внимание уделяется оценке эффективности различных подходов, их экологической безопасности и перспективам практического применения в пищевой и фармацевтической промышленности.

Основные задачи исследования включают:

- 1) Проведение сравнительного анализа традиционных и современных методов экстракции БАВ;
- 2) Оценку эффективности различных аналитических методик для идентификации и количественного определения биологически активных соединений;
- 3) Изучение современных подходов к модификации структуры БАВ с целью повышения их стабильности и биодоступности;
- 4) Выявление ключевых закономерностей между структурными особенностями соединений и их функциональной активностью.

Создание пищевых продуктов функциональной направленности представляет собой динамично развивающуюся отрасль пищевой промышленности. Для разработки таких продуктов на основе растительных ингредиентов необходимо учитывать химическое строение и биохимические особенности БАВ, а также применять комплексный подход при выборе методов экстракции и анализах полученных соединений.

2. Объекты и методы

Для проведения систематического анализа были использованы научные публикации, отобранные из международных библиографических баз данных: Scopus, Web of Science, eLibrary.RU, PubMed, EMBASE и Google Scholar. Поиск литературы проводился с использованием следующих ключевых терминов на русском и английском языках: *биологически активные вещества растительного происхождения, методы выделения БАВ, сверхкритическая флюидная экстракция, ультразвуковая экстракция, циклотиды, пептидная трансплантация, анализ БАВ, антоцианы, вторичные метаболиты, количественная оценка, окислительные радикалы, ВЭЖХ, спектрофотометрия, современные методы анализа БАВ, оценка антиоксидантной активности*. Основными критериями включения публикаций в обзор были:

- Год публикации: преимущественно 2015–2024 гг., с включением отдельных фундаментальных работ более раннего периода;
- Наличие экспериментальных данных по методам выделения, анализа или модификации БАВ;
- Описание методологии исследований и полученных результатов;
- Цитируемость и рейтинг издания (предпочтение отдавалось статьям в журналах Q1–Q2).

Исключались публикации:

- Без подробного описания методов исследования;
- С недостоверными или неподтвержденными результатами;
- Не содержащие данных о структуре или свойствах изучаемых соединений.

3. Основные классы БАВ

Биологически активные вещества (БАВ) — это группа органических соединений, встречающихся в природе и проявляющих высокую биологическую активность. Среди множества известных классов БАВ особое место занимают фенольные соединения.

Фенольные соединения представляют собой обширную группу химических веществ, которые характеризуются наличием одной или нескольких фенольных групп (–ОН), связанных с ароматическим кольцом. Эти соединения широко распространены в растительном

мире и играют важную роль в метаболических процессах растений, включая защиту от ультрафиолетового излучения, патогенов и травоядных организмов. Классификация фенольных соединений включает несколько основных групп, таких как простые фенолы, фенольные кислоты, кумарины, флавоноиды, танины и лигнаны [6]. Каждая из этих групп обладает уникальной структурой и биологической активностью. Флавоноиды известны своими антиоксидантными и противовоспалительными свойствами, что делает их ценными для использования в медицине и пищевой промышленности. Эти соединения демонстрируют выраженную антиоксидантную активность благодаря способности нейтрализовать свободные радикалы, что предотвращает окислительный стресс и связанные с ним повреждения клеток [7]. Галловая кислота служит характерным примером соединения с высокой антиоксидантной активностью. Кроме того, «в результате комплексообразования с циклодекстринами происходит изменение физико-химических свойств и биодоступности различных классов биологически активных соединений» [8]. Это подчеркивает значимость фенольных соединений для изучения их потенциального применения в различных отраслях [9].

Стильбены представляют собой класс биологически активных веществ, обладающих значительным фармакологическим потенциалом. Наиболее изученным представителем этой группы является ресвератрол, который содержится в винограде, в красном вине и в некоторых ягодах. Он известен своими антиоксидантными и противовоспалительными свойствами, что делает его ценным для профилактики и лечения различных заболеваний [10]. Исследования показали, что ресвератрол способствует снижению риска сердечно-сосудистых заболеваний, улучшая функцию эндотелия сосудов и снижая уровень липидов в крови [11]. Кроме того, стильбены проявляют антимикробную активность против ряда патогенных микроорганизмов, включая бактерии и грибки [12]. Эти свойства делают их перспективными для разработки новых терапевтических средств, что подчеркивает их значимость в современной медицине.

Флавоноиды, такие как катехины и кверцетин, являются мощными антиоксидантами, которые способны эффективно нейтрализовать свободные радикалы, предотвращая окислительное повреждение клеток. Это свойство играет ключевую роль в защите организма от хронических заболеваний, включая сердечно-сосудистые и нейродегенеративные расстройства. Механизм действия флавоноидов заключается в их способности отдавать электроны или водородные атомы, что способствует стабилизации свободных радикалов и предотвращает цепные реакции окисления. Таким образом, флавоноиды оказывают значительное положительное влияние на здоровье человека, снижая риск развития различных патологий [13].

Флавоноиды, такие как апигенин и лютеолин, обладают выраженными противовоспалительными свойствами, которые проявляются через их воздействие на биохимические процессы в организме. Они ингибируют синтез провоспалительных цитокинов, таких как интерлейкин-6, и подавляют активность ферментов, участвующих в воспалительных реакциях, таких как циклооксигеназа [14]. Это приводит к снижению интенсивности воспалительных процессов, что особенно важно при лечении хронических воспалительных заболеваний. Благодаря этим свойствам флавоноиды могут быть использованы в качестве природных противовоспалительных средств. Цитрусовые фрукты (например, апельсины и лимоны) являются одними из богатейших природных источников флавоноидов, включая такие соединения, как гесперидин и нарингенин [15]. Эти вещества известны своими мощными антиоксидантными и противовоспалительными свойствами, что делает их ценными для поддержания здоровья. Кроме цитрусовых, флавоноиды также присутствуют в других растениях, таких как ягоды и зеленый чай, что делает их доступными в рационе питания человека.

Среди лигнанов выделяют несколько групп, таких как подофиллотоксины, сесамин и энтеролигнаны. Эти группы различаются по степени насыщенности углеродной цепи, по наличию функциональных групп и по пространственному расположению атомов, что непосредственно влияет на их биологическую активность. Важно отметить, что «поглощение света веществом в ультрафиолетовой и видимой областях спектра зависит от электронной структуры молекулы» [16]. Таким образом, различия в электронной структуре лигнанов могут оказывать влияние на их взаимодействия со светом, что, в свою очередь, сказывается на их биологической активности. Лигнаны широко распространены в растительном мире, и их основными источниками являются семена льна, кунжута, цельные зерна, а также некоторые овощи, такие как брокколи и морковь [17]. Кроме того, стоит отметить, что кукурма «традиционно использовалась в качестве активного компонента в составе фитопрепаратов и в повседневном питании

в качестве самостоятельной приправы» [18]. Регулярное употребление лигнанов связано с улучшением состояния сердечно-сосудистой системы. Эти вещества способствуют снижению воспалительных процессов и повышению эластичности сосудов, что снижает риск развития атеросклероза. Включение лигнанов в рацион положительно влияет на поддержание здоровья сердца и сосудов.

4. Методы выделения биологически активных веществ растительного происхождения

Традиционные методы экстракции включают мацерацию, дистилляцию, прессование, настаивание, сбраживание, перколяцию, отваривание с обратным холодильником, настойку и методы Сокслета. Современные методы экстракции включают в себя жидкостную экстракцию под давлением, сверхкритическую жидкостную экстракцию, экстракцию с помощью ультразвука, микроволновую экстракцию, экстракцию импульсным электрическим полем, ферментативные методы экстракции, а также вариации их параметров.

4.1. Традиционные методы экстракции

Традиционные методы выделения биологически активных веществ растительного происхождения, в частности мацерация и дистилляция, имеют долгую историю использования. Мацерация, будучи одним из старейших методов экстракции, применялась еще в античные времена для получения растительных экстрактов, включая эфирные масла и настойки [19]. Метод мацерации — простой способ экстракции, при котором материал измельчают и помещают в растворитель (вода, этанол, метанол), а затем выдерживают определенное время при комнатной температуре или в термостате. Затем фильтруют экстракт от твердого остатка [20]. Для повышения эффективности процесса смесь периодически перемешивают, улучшая проникновение растворителя в образец. К преимуществам метода относятся простота применения и несложная экспериментальная установка, к недостаткам — продолжительность экстракции и низкую производительность. Метод применим преимущественно для образцов с термоустойчивыми компонентами.

Дистилляция как метод выделения эфирных масел впервые была описана в трудах Авиценны в XI веке [21]. В данном методе образцы кипятят в течение 2–8 часов, при этом пары направляют в холодильник, где они снова превращаются в жидкость. Выделяют водную и паровую дистилляцию. Водяная дистилляция подходит для мелких порошкообразных или небольших размеров растительных материалов. Цвет масел темнее, запах интенсивнее, но большие количества исходного сырья требуют много времени и приводят к разложению некоторых компонентов [22]. Паровая дистилляция — экологичный метод, основанный на применении водяного пара. Эффективность метода высока, особенно для мелкодисперсных образцов. Однако метод включает необходимость большого объема сырья и возможность разрушения летучих компонентов при длительном кипячении.

Еще одним традиционным методом извлечения БАВ является прессование — метод выделения веществ путем приложения давления. Выделяют холодное прессование, сохраняющее полезные летучие компоненты, и горячее прессование. Холодное прессование проходит в четыре стадии: очистка, сушка, дробление и непосредственно прессование, при котором используют гидравлические прессы или механические механизмы с вращающимся поршнем для извлечения масла из растений [23].

Главное преимущество холодного прессования — низкое энергопотребление и отсутствие растворителей и высоких температур, что предотвращает деградацию многих БАВ, однако эффективность холодного прессования ниже, чем у других методов, что затрудняет промышленное производство продукта.

Перколяция также является одним из традиционных методов получения БАВ. Используется перколятор — стеклянный конусообразный аппарат с открытыми концами. Высушенный материал предварительно смешивают с растворителем на 4 часа, затем переносят в перколятор и оставляют на сутки при комнатной температуре. Далее добавляют растворитель до насыщения смеси и открывают нижний конец аппарата, позволяя жидкости медленно стекать под действием силы тяжести. Процесс продолжается добавлением растворителя до максимального выхода экстракта, после чего экстракт отделяется фильтрацией [24]. К преимуществам относится увеличение выхода БАВ за счет максимальной разницы концентраций — постепенное извлечение чистым экстрагентом. К недостаткам можно отнести низкую скорость процесса и большое количество экстрагента [25].

Приготовление отваров также известно с древних времен и основано на кипячении растительного сырья в воде. Продолжительность обычно составляет 15–20 минут, а гидромодуль — 1:4 или 1:16. После

кипячения смесь охлаждают и фильтруют. Исследования показали высокую активность антиоксидантов и содержание фенольных соединений в извлечениях данным методом, но стоит учитывать термостойкость извлекаемых БАВ.

Впервые экстракция Сокслета, а также сам экстрактор описываются в статье, посвященной определению молочного жира в 1879 году [26]. Экстракция Сокслета выполняется специальным устройством, состоящим из колбы с растворителем, над ней — стеклянный цилиндр с сифоном, где хранится образец, верхняя часть — холодильник [27]. Измельченный растительный материал погружают в органический растворитель, который многократно циркулирует между колбой и образцом, пока активный компонент не перейдет в раствор. К преимуществам можно отнести экономию растворителя, так как он циркулирует в системе, а также высокий выход целевых соединений. Недостаток метода — длительное время экстракции.

Рефлюкс — метод твердо-жидкостной экстракции, аналогичный методу Сокслета. Экстрагент кипит при постоянной температуре, образуя пар, который конденсируется обратно в сосуд с образцом. Применяется простая колба с обратным холодильником. Главное преимущество рефлюксной экстракции — высокая эффективность извлечения БАВ, однако её недостатком является длительность процесса [28].

Описанные традиционные методы оставались основными инструментами для получения биологически активных веществ на протяжении веков, однако эти подходы имеют свои ограничения. Например, эффективность извлечения активных веществ в таких методах составляет около 60–70%, что уступает современным технологиям. Это связано с ограниченной возможностью извлечения сложных соединений, а также с высоким расходом времени и ресурсов: высокое потребление энергии, значительные денежные затраты, длительность процесса, потребность в больших объемах растворителей, необходимость последующего выпаривания растворителя и снижение эффективности из-за термического распада чувствительных компонентов. Современные методы экстракции направлены на устранение указанных недостатков. Тем не менее традиционные методы продолжают использоваться благодаря их простоте и доступности, особенно в случаях, где требуется минимальная обработка сырья.

4.2. Современные методы экстракции

Современные методы экстракции биологически активных веществ растительного происхождения представляют собой инновационные подходы, которые направлены на повышение эффективности извлечения целевых соединений с минимальными затратами ресурсов и времени.

Экстракция под высоким давлением — усовершенствованный вид экстракции. Благодаря созданию высокого давления растворитель остается жидким даже при очень высоких температурах [29]. Преимущества ускоренной экстракции растворителями заключаются в возможности автоматизации, быстром времени экстракции, уменьшении расхода растворителя и в возможности выбора различных типов растворителей.

Сверхкритическая флюидная экстракция — процесс экстракции с использованием сверхкритического флюида в качестве растворителя. Флюиды имеют низкую вязкость, нулевое поверхностное натяжение и высокую плотность, что способствует быстрому проникновению в пористые материалы и лучшему растворению компонентов [30]. По сравнению с традиционными методами, данный вид экстракции обладает большей скоростью и эффективностью, применяется в пищевой промышленности, фармацевтике и экологии. Перед употреблением полученных масел требуется дополнительная очистка для удаления нежелательных примесей.

Ультразвуковая экстракция — метод, использующий ультразвуковые волны (как правило, 20–25 кГц) для ускорения перехода активных компонентов из клеток в растворитель. Ультразвук разрушает клеточные стенки, облегчая контакт с растворителем. Система экстракции с помощью ультразвука может быть стабильной или активной. Преимущество метода активной экстракции заключается в том, что активные ингредиенты из образца удаляются, как только они попадают в растворитель [31]. Метод экстракции с помощью ультразвука используется для улучшения качества пищевых продуктов, минимизации потери питательных веществ в продуктах и частичного сохранения витаминов. УЗЭ особенно эффективна для извлечения флавоноидов из растений, таких как гинкго билоба, а также позволяет значительно сократить время обработки [32].

Микроволновая экстракция — современный метод экстракции, при котором микроволновые печи генерируют электромагнитные волны частотой 300–300 000 МГц, позволяющие достичь быстрого

нагрева и разрушения клеточных структур. Существует две системы микроволновой экстракции: закрытая система с регулируемым давлением и температурой, и открытая система атмосферного давления [33]. Закрытые сосуды позволяют повысить давление и температуру, в открытых системах температура определяется точкой кипения растворителя. Микроволновая экстракция эффективнее традиционной, так как позволяет получать высококачественный экстракт за короткий промежуток времени, используя минимальное количество растворителя. Этот метод весьма предпочтителен по сравнению с традиционными методами из-за высокой эффективности экстракции за короткое время с использованием небольшого количества растворителя. Исследования показывают, что микроволновая экстракция, проведенная в течение 10 минут, обеспечила больший выход и большее количество фенольных веществ по сравнению с экстракцией Сокслета, занимавшей 480 минут. Данный метод демонстрирует высокую эффективность при извлечении антиоксидантов из кожуры винограда, что делает его востребованным в производстве функциональных пищевых продуктов.

Экстракция в импульсном электрическом поле также является одним из современных методов экстракции, который увеличивает массообмен, разрушая растительную матрицу. Таким образом, время экстракции сокращается, а эффективность повышается. Данный метод является новой, чистой, безвредной для окружающей среды, эффективной и быстрой системой, как для лабораторного извлечения полифенолов, так и, например, для нефтяной промышленности [34].

При ферментативной экстракции используются гидролизующие ферменты, такие как альфа-амилаза, целлюлаза и пектиназа, позволяющие эффективно извлекать внутриклеточные макромолекулы из природных продуктов [35]. В исследованиях ферментативный метод показал значительное увеличение выхода полисахаридов и хлорогеновой кислоты по сравнению с экстракцией без ферментов. Также применение энзимов целлюлозы и пектиназы позволило увеличить эффективность экстрагирования липоидов и каротиноидов в десять раз по сравнению с обычной экстракцией растворителями [36].

Одним из наиболее перспективных методов является сверхкритическая флюидная экстракция (SCFE). Метод основан на использовании сверхкритического углекислого газа для эффективного извлечения биологически активных веществ. Уникальные свойства сверхкритического флюида — диффузионная способность и низкая вязкость — обеспечивают его преимущества. SCFE широко применяется для получения кофеина из кофе и экстракции эфирных масел, что делает его незаменимым в пищевой и косметической промышленности [37].

Таким образом, современные методы экстракции не только обеспечивают высокую эффективность извлечения биологически активных веществ, но и способствуют развитию устойчивых технологий в различных отраслях промышленности.

4.3. Сравнительный анализ методов экстракции

Критерии оценки методов экстракции являются основополагающими для выбора наиболее подходящего способа выделения биологически активных веществ из растительного сырья. Одним из ключевых факторов является эффективность извлечения, которая определяется количеством вещества, извлеченного из сырья, относительно его общего содержания. Высокая эффективность позволяет максимально использовать исходное сырье, что особенно важно при работе с редкими или дорогостоящими растительными материалами. Вторым важным критерием является селективность метода, отражающая его способность избирательно выделять целевые соединения, минимизируя извлечение нежелательных примесей. Это особенно значимо при необходимости получения чистого продукта для дальнейшего анализа или использования. Кроме того, при выборе метода экстракции необходимо учитывать энергозатраты и экологическую безопасность. Методы, требующие минимального потребления энергии и использования безопасных для окружающей среды растворителей, имеют преимущество, так как они соответствуют современным требованиям устойчивого развития. Комплексная оценка методов экстракции по этим критериям позволяет не только повысить эффективность процесса, но и минимизировать его воздействие на окружающую среду.

4.4. Аналитические методы исследования биологически активных веществ

Выделенные из вторичных метаболитов растений биологически активные вещества могут содержаться в чистом виде в различных концентрациях. Для различных отраслей промышленности необходимое количество может варьироваться от нескольких миллилитров до сотен литров, учитывая специфику, объемы производства и тип готовой продукции. Несмотря на совершенствование биотехнологических

методов выделения БАВ, анализ содержания имеет огромную роль для стабильного применения, особенно в пищевой промышленности.

Обратимся к пигментам растений, которые придают цвет огромному числу фруктов, ягод и овощей, которые, в свою очередь, являются натуральным сырьем для производства джемов, фруктовых пюре, конфитюров, десертов, соков и т. д. В соковой промышленности широко распространены антоцианы (сопутствующее название — антоцианины), принадлежащие к обширному классу флавоноидов. Именно они придают наиболее яркие и привлекательные красные, оранжевые и фиолетовые оттенки во всей сокосодержащей продукции. Цвет пигмента зависит от pH среды: в кислой среде они красные, в нейтральной — фиолетовые, в щелочной — синие.

Антоцианы, помимо красящих свойств, обладают антиоксидантной активностью, которая снижает риск сердечно-сосудистых заболеваний благодаря нейтрализации свободных радикалов. Ученые из университета Тохоку (Япония) проводили сравнительный анализ агликонов и гликозидов антоцианинов, полученных из черной смородины. Антиоксидантная активность была измерена в нейтральной области pH с использованием системы эмиссии хемилюминесценции в присутствии системы H₂O₂-ацетальдегид. Было обнаружено, что интенсивность зависит от трех факторов: значения pH, агликона и сахара C-3. При увеличении pH от 4,0 до 9,0 интенсивность хемилюминесценции увеличивалась от pH 5,0, достигала максимума при pH 6,0–7,0 и уменьшалась при pH 9,0 [38]. Помимо свойств сильных антиоксидантов, антоцианы обладают противовоспалительными и иммуностимулирующими свойствами.

Коллеги из Самарского медицинского университета разработали метод количественного определения антоцианинов в растительном лекарственном сырье. Полученные результаты способствовали увеличению чувствительности и воспроизводимости аналитических результатов, а также обеспечили сокращение продолжительности анализа по сравнению с прототипом. Данный способ экстракции предполагает извлечение антоцианов из лекарственного растительного сырья в оптимальных условиях. Для этого используют водно-спиртовые смеси с концентрацией этанола не менее 70 % и с добавлением 0,5–1,0 % хлороводородной кислоты. Отбирают две одинаковые аликвоты и помещают в две мерные колбы, в одной из которых объем раствора до метки доводят 95 % спиртом этиловым (раствор сравнения), в другой — 95 % этиловым спиртом, содержащим 0,5 % аммиака (испытуемый раствор). Растворы перемешивают и в течение одной минуты измеряют их оптическую плотность в кювете с толщиной рабочего слоя 10 мм. Измерения проводят при аналитической длине волны 611–630 нм, выбираемой в зависимости от максимума поглощения исследуемого объекта, который соответствует наибольшей разнице оптической плотности между пробой в растворе аммиака и исходным раствором [39]. После получения оптической плотности исследуемого образца рассчитывают сумму антоцианов. Расчет проводят по математической формуле с использованием значений оптической плотности раствора стандартного образца, массы навески анализируемого образца и навески цианидин-3-О-гликозида. Сравняя предлагаемый метод с методикой по ГОСТ 32709-2014¹, можно отметить ряд преимуществ. Одно из них — существенное сокращение времени, необходимого для пробоподготовки.

Способность антоцианинов реагировать изменением цвета на изменения pH-среды напрямую связана с показателями оптической плотности раствора при pH 1,0 и pH 4,5. Указанные значения pH создаются с использованием буферных растворов. В ряде исследуемых образцов при доведении объема до метки с использованием буферного раствора наблюдалось образование слабой опалесценции, предположительно из-за смены растворителя. Появление легкой мутности могло способствовать увеличению оптической плотности. При дифференциальном измерении это, в свою очередь, может привести к занижению результатов.

Больше всего в ягодах содержится антоцианидинов (цианидин, делфинидин, малвединин, пентунин) и флавонолов (кверцетин). Кверцетин содержится в большинстве широко распространенных ягод. Его можно встретить в красных и зеленых сортах винограда [40]. Особенно ценным источником кверцетина являются виноградные косточки [41]. Наряду с другими ягодами, виноград богат антиоксидантами, которые защищают клетки организма от воздействия активных форм кислорода (ROS), предотвращая их разрушение и снижая окислительный стресс [42]. На данный момент известен флуориметрический метод определения абсорбционной емкости по отношению к кислородным радикалам (ROO- и RO-).

¹ ГОСТ 32709-2014 «Продукция соковая. Методы определения антоцианов». М.: Стандартинформ, 2014. — 20 с.

Метод основан на изменении интенсивности флуоресценции в зависимости от времени протекания реакции. Количественное изменение антиоксидантной активности проводится по определению площади между двумя кривыми показаний реакций — в отсутствие и в присутствии антиоксиданта (сокр. ORAC). Необходимым инструментом при использовании данного метода является флуоресцентный зонд (англ. вариант *probe*), который повреждается свободными радикалами, и с помощью этих повреждений, а также при снижении интенсивности флуоресценции, происходит определение содержания антиоксидантов в образце. Чем меньше поврежден зонд, в роли которого чаще всего выступает флуоресцеин, тем больше антиоксидантов и, следовательно, выше индекс ORAC. Другими словами, индекс ORAC показывает количество антиоксидантов в продукте, измеряя его способность нейтрализовать свободные радикалы.

Способность веществ поглощать окислительные радикалы сравнивается с механизмом окислительной деградации липидов, которая, в свою очередь, помогает предотвратить повреждение барьера проницаемости клетки и избежать ее гибели [43]. Окислительная деградация липидов приводит к образованию малонового диальдегида и 4-гидроксинафенала, а также изопропанов из ненасыщенных жирных кислот [44]. Малоновый диальдегид, или MDA, используется в качестве биомаркера для измерения окислительного стресса в различных биологических образцах у пациентов, страдающих широким спектром заболеваний [45], а его повышенное содержание говорит о наличии сосудисто-сердечных и нейродегенеративных заболеваний.

Метод ORAC-SIA, недавно разработанный на основе ORAC, позволяет измерять антиоксидантную активность нескольких образцов пищевых продуктов с применением флуоресцеина в качестве флуоресцентного зонда. Он сокращает время анализа до 5 минут и снижает содержание AAPH на 67 % по сравнению с 90 минутами стандартного метода ORAC. Порядок аспирации был следующим: образец AAPH/стандартный флуоресцеин вводился в поток носителя на водной основе. Расчет антиоксидантной способности производился по высоте пика флуоресцеина, поэтому не требовалось ни времени задержки, ни измерения площади. Предложенный метод показал превосходную точность ($RSD < 3\%$), $LOD_{3,13}$ $\mu\text{моль} \cdot \text{л}^{-1}$ и восстановление 90–107 % [46]. В Таблице 1 представлены широко распространенные продукты, богатые антиоксидантами. Единица измерения ORAC — микромоль тролокс эквивалента на 100 грамм (тролокс — водорастворимый аналог витамина E), известны рекомендации по употреблению продуктов с индексом ORAC от 3000 до 5000 в день [47].

Таблица 1. Продукты с максимальным значением индекса ORAC
Table 1. Products with the maximum value of the ORAC index

№	Продукт	ORAC ($\mu\text{моль TE}/100 \text{ г}$)	Источник
1	Корица молотая	267 536	[48]
2	Асаи	102 700	[47]
3	Magni (порошок)	75 000	[47]
4	Magni (сок ягод)	40 000	[47]
5	Годжи	25 300	[47]
6	Черноплодная рябина	16 062	[48]
7	Клюква	9 584	[47]
8	Черника сорта “Элиот”	8 869	[49]
9	Смородина черная	7 960	[47]
10	Дикая вишня	6 608	[49]
11	Голубика	6 552	[47]
12	Ежевика	5 347	[47]
13	Слива сорта “Блэк Амбер”	4 856	[49]
14	Авокадо Хасс	4 853	[49]
15	Красные яблоки	3 919	[49]
16	Абрикосы	3 158	[49]
17	Малина	2 870	[50]
18	Напиток черничный с белым чаем, пастеризованный	2 361	[51]
19	Груша Азиатская	2 254	[49]

Разработан уникальный метод оценки антиоксидантной активности как отдельных фенольных соединений, так и их смесей с помощью ORAC в кислотных условиях, подобных среде желудка человека. Уровень pH в желудке примерно равен 2, что является

показателем кислотности повышенной группы. В роли смесей могут выступать вина, соки, чай. Было использовано окислительное поглощение флуоресцеина, пиранина и пирогаллолового красного, трех зондов, широко используемых в анализах ORAC, вызванных пероксильными радикалами. В качестве источника пероксильных радикалов использовали дигидрохлорид азобис(2-амидинопропана) (AAPH) [52]. На основе хроматограмм, полученных методами ВЭЖХ и масс-спектрометрии, установлено, что пирогаллол красный сохраняет потенциал молекулы-мишени для пероксильных радикалов в отличие от флуоресцеина и пиранина. Это делает его пригодным для применения в анализе типа ORAC в кислых условиях.

Использование хроматографического метода не является редкостью при анализе БАВ, а наоборот, анализ успешно интегрирован во многие процессы исследования пищевых продуктов, а также является самостоятельным аналитическим инструментом для количественной оценки содержания биологически активных веществ во вторичных метаболитах растений. Современные анализаторы позволяют идентифицировать количественное содержание белков, липидов, аминокислот, моно- и полисахаридов, а также весь список витаминов. ВЭЖХ является универсальным и воспроизводимым методом, он имеет широкое применение в различных областях пищевой индустрии с точки зрения количественной и качественной оценки активных молекул [53]. Для более точного анализа образцов разрабатываются композиты и нанокompозиты в качестве сорбента для высокоэффективной экстракции и сверхчувствительного определения пищевых красителей. Ученые из Университета Салахадина в Эрбле (Ирак) проводили исследование красителя *Allura red AC* (AR). Анализ проводился с использованием чувствительного метода, а именно ультразвуковой сопряженной дисперсионной нанотвердофазной микроэкстракционной спектрофотометрии (UADNSPME-UV-Vis) для AR в качестве предварительного концентрирования и определения пищевого красителя в реальных образцах. Метод основан на первом использовании органического каркаса амарантовой углеродной точки Zn (II), включающего композит бензимидазола (ZIF-7) [54]. Синтезированный нанокompозит обладал значительной адсорбционной емкостью и возможностью повторного использования, а предложенный метод показал превосходную линейность в диапазоне 0,3–7,0 нМ.

ZIF-7 представляет собой тип металлоорганического каркаса (MOF) с кристаллической структурой, в которой тетраэдрические центры переходных металлов связаны имидазольными лигандами. Имеет широкое применение в создании мембран с высокой селективностью и проницаемостью, а также адсорбента газов участвует в катализе химических реакций и в последнее время активно применяется в хроматографическом анализе. Он обладает высокой пористостью и термостабильностью, что делает ZIF-7 перспективным нанокompозитом. Было проведено исследование по синтезу наночастиц серебра путем иммобилизации на микрокристаллах ZIF-7 для восстановления нитроароматических соединений и органических красителей. Каркас имеет отрицательный поверхностный заряд. Данный факт и использование поверхности соединения влияют на образование нитроароматических соединений серебра более высокого порядка [55]. Был предложен простой метод мокрой химии для декорирования высокодисперсных круглых наночастиц Ag на ZIF-7, в результате чего за один шаг получается композит Ag/ZIF-7 (ZA-1). ZA-1 действует как превосходный катализатор для восстановления нитроароматических соединений и органических красителей [56].

Масс-спектрометрия MALDI-TOF (матрица-ассистированная лазерная десорбция-ионизация (MALDI) и времяпролетный детектор (TOF)) является многообещающей стратегией для выявления закономерностей в данных, создавая соответствующую методологию для быстрой и точной идентификации микроорганизмов, белков и пептидов, ДНК и РНК. С помощью данной методики появляется возможность идентификации биомаркеров для определения качества сырья в пищевой промышленности. Более 15 биомаркеров позволили более точно определить профиль здорового и инфицированного лосося [57]. Комбинирование масс-спектрометрии MALDI-TOF и ВЭЖХ позволяет быстро идентифицировать фенольные соединения в смеси и представлять уникальный сокристаллический рисунок для каждой фенольной кислоты. ВЭЖХ может различать фенольные кислоты, а MALDI-TOF MS обеспечивать сопоставимые профили масс (m/z) для образцов [58]. Это комбинированное исследование является быстрым в точной идентификации и структурном анализе фенольных кислот с различными массами.

Для антоцианов использование времяпролетной матрично-активированной лазерной десорбции является новым методом анализа в пищевой промышленности. В сравнении с ВЭЖХ время получения

данных сокращается в 2,5 раза с 70 минут до 20 при пяти точках исследования, но существует риск слабой воспроизводимости от точки к точке в связи с неоднородностью кристаллов матрицы MALDI-TOF. В исследовании сравнительных результатов анализа антоцианов в ягодах голубики высокорослой с помощью ВЭЖХ и MALDI-TOF MS было показано, что увеличенное число активаций на матрице позволяет снизить отклонения в образцах [59]. Анализ антоцианов с помощью комбинации методов открывает возможность существенно сократить время исследования. Разработанный метод позволяет быстро выявлять и количественно определять антоцианы в других пищевых продуктах, что способствует разработке антоциановых «отпечатков пальцев» для изучения различий в сортах фруктов, ягод, овощей и сроках их созревания.

Активность антиоксидантов может быть проверена с помощью различных аналитических методов, связанных с различными свойствами тестируемых соединений, с одной стороны, и с различными стадиями окислительного процесса и различным пониманием роли антиоксидантов, с другой стороны. Особой популярностью пользуются спектрофотометрические методы ABTS и DPPH, зарекомендовавшие себя благодаря простоте анализа, однако существует несовместимость данных из-за различных вариантов используемых анализов.

Предложение об использовании 2,2'-азино-бис-3-этилбензотиазолин-6-сульфоновой кислоты (ABTS) для измерения общей антиоксидантной активности появилось в конце XX века. Первоначально метод был представлен как аддитивный и заключался в непрерывном образовании ABTS⁺ из субстрата, присутствующего в реакционной среде, в результате действия перекиси водорода в реакции, катализируемой добавлением метмиоглобина [60]. Ввиду частоты случаев завышения результатов была проведена оптимизация метода, когда радикалы предварительно получали из ABTS прямой реакцией с персульфатом калия (пост-аддитивный метод) в течение не менее 6 ч. Затем радикалы разбавляли PBS или этанолом до получения оптической плотности 0,7 и смешивали с образцом. Определение заключалось в измерении остаточных радикалов после предполагаемого времени реакции, которое составляло примерно 5–6 минут [61]. Усовершенствованная методика релевантна к применению как в пищевой промышленности, так и при анализе биоматериалов.

Спектрофотометрический метод основан на способности DPPH, стабильного свободнорадикала, принимать электрон или атом водорода от антиоксидантов, что приводит к изменению цвета раствора. При добавлении антиоксиданта к раствору DPPH антиоксидант отдает свой электрон или атом водорода радикалу DPPH, нейтрализуя его цвет, и принимает фиолетовый оттенок. В работе Брэнда-Уильямса авторы предложили использовать метанольный радикальный раствор (DPPH доступны в виде готовых радикалов — простота их использования, вероятно, влияет на их популярность) для изучения антиоксидантной активности пищевых ингредиентов путем измерения поглощения радикалов, остающихся в реакционной среде [62]. Первоначально время измерения составляло несколько часов, но в дальнейшем улучшение методики позволило значительно сократить показатель вплоть до 30 минут. Одним из недостатков данного способа является использование в качестве растворителей органических соединений, таких как этанол или метанол, что ставит под вопрос анализ водных экстрактов.

5. Проблемы методов выделения и анализа БАВ

Процесс экстракции биологически активных веществ из растительного сырья сопряжен с рядом сложностей. Одной из значимых проблем является выделение целевых соединений из сложных многокомпонентных матриц, характерных для растительных материалов. Эти матрицы содержат широкий спектр химических соединений, включая белки, углеводы, липиды и другие биоорганические вещества, что делает экстракцию целевых веществ, часто представленных в низких концентрациях, чрезвычайно трудной задачей. Химическое разнообразие и сложность растительных матриц требуют применения высокоэффективных методов выделения, обеспечивающих селективность и минимизирующих потери целевых соединений [63]. Дegradaция биологически активных веществ в процессе экстракции является серьезной проблемой, особенно для термолабильных соединений. Например, высокие температуры, часто используемые при традиционных методах экстракции, могут вызывать термическое разрушение таких соединений, как полифенолы и витамины. Кроме того, длительное время обработки способствует их дальнейшей деградации. Эти процессы приводят к снижению биологической активности экстрагируемых веществ, что негативно сказывается на эффективности их последующего использования.

Низкая селективность методов экстракции представляет собой еще одну важную проблему [64]. К примеру, мацерацией зачастую извлекают широкий спектр веществ, включая нежелательные соединения, такие как липиды, белки и другие компоненты, не относящиеся к целевым. Это приводит к необходимости проведения дополнительных стадий очистки, что увеличивает сложность и стоимость процесса. Более того, присутствие нежелательных соединений может осложнить анализ целевых веществ, снижая точность и воспроизводимость результатов.

Примером, демонстрирующим трудности экстракции, является извлечение алкалоидов из растений семейства Пасленовые. Традиционные методы экстракции часто приводят к извлечению значительного количества хлорофиллов, что требует дополнительных стадий очистки для получения чистого продукта. Это не только снижает эффективность процесса, но и увеличивает его продолжительность и затраты. При этом необходимость разработки более селективных и эффективных методов экстракции становится очевидной. В этом контексте стоит отметить, что проведены исследования по экспериментальному обоснованию и разработке условий предварительной обработки ягод клюквы при получении сока с применением различных способов (бланширование, СВЧ, УЗ, ферментативная обработка), обеспечивающие наиболее полную экстракцию в сок антоциановых соединений [65]. Подобные подходы могут послужить основой для оптимизации процессов экстракции алкалоидов, предлагая новые методы, способные повысить эффективность и снизить затраты. При использовании современных способов анализа БАВ все чаще появляются расхождения в результатах при использовании схожих методик. Это следует из вариативности методов, когда предпочтение отдается более быстрому способу исследования. Оптимизация времени пробоподготовки, проведения анализа и сопоставления результатов является важными аспектами при улучшении существующих аналитических методик и разработке новых. Количественные методы анализа направлены на максимально точные показатели определяемых соединений вторичных метаболитов растений. Воспроизводимость и увеличение чувствительности получаемых результатов играет важную роль при выборе типа аналитического исследования.

6. Тенденции развития методов и перспективные направления исследований

Современные технологии миниатюризации, такие как микрофлюидика, открывают новые возможности в области анализа биологически активных веществ. Эти методы позволяют значительно уменьшить объемы используемых реагентов и образцов, что не только снижает затраты, но и минимизирует экологическое воздействие. Например, микрофлюидные чипы, применяемые для анализа сложных биологических систем, обеспечивают высокую точность и эффективность исследований. Такие инновации способствуют развитию более устойчивых и экономически выгодных подходов в химическом анализе. Автоматизация процессов экстракции и анализа играет ключевую роль в снижении влияния человеческого фактора на результаты исследований. Внедрение роботизированных систем в лабораторную практику позволяет значительно повысить точность и воспроизводимость аналитических данных. Например, автоматические экстракторы обеспечивают стабильность условий экстракции, что особенно важно для анализа сложных матриц. Кроме того, автоматизация способствует ускорению аналитических процессов, что важно для исследований, требующих обработки большого количества образцов. Например, автоматизированные системы экстракции используются для определения содержания флавоноидов в растительных экстрактах, что позволяет значительно сократить время анализа и повысить его эффективность. Таким образом, автоматизация становится неотъемлемой частью современных методов анализа. Принципы «зеленой химии» находят все большее применение в области экстракции биологически активных веществ, способствуя повышению экологической безопасности методов. Использование растворителей на основе воды или этанола вместо токсичных органических растворителей позволяет минимизировать вредное воздействие на окружающую среду. Например, экстракция биоактивных веществ с использованием сверхкритического углекислого газа является эффективным и экологически безопасным методом, который активно внедряется в аналитическую практику. Непрерывное развитие индустрии производства нанокмполитов открывает широкие возможности для исследования возможностей интеграции синтезированных материалов в ускоренный анализ биологически активных веществ. Такие свойства, как термолабильность, твердость, пористость и устойчивость к механическому воздействию, позволяют тестировать наноматериалы в методы хроматографии, получать максимально точные результаты

детектирования, обеспечивают долговечность сорбента. В современных исследованиях методов экстракции и анализа биологически активных веществ (БАВ) особое внимание уделяется разработке инновационных подходов, направленных на повышение эффективности и экологичности процессов. Одним из перспективных направлений является использование методов сверхкритической флюидной экстракции (СФЭ). Этот метод базируется на применении сверхкритических флюидов, таких как углекислый газ, который обладает уникальными физико-химическими свойствами, позволяющими эффективно извлекать целевые компоненты из растительного сырья. Преимущества СФЭ включают снижение расхода органических растворителей, повышение селективности извлечения и уменьшение воздействия на окружающую среду. Исследования, опубликованные в журнале *Green Chemistry*, подтверждают, что внедрение СФЭ способствует улучшению качества экстрагированных БАВ, что делает этот метод перспективным для дальнейшего развития. Использование индекса ORAC для определения антиоксидантной активности, а также его улучшенной версии ORAC-SIA позволяют сокращать время исследования и открывают возможности исследования сложных смесей с содержанием различных групп веществ.

7. Выводы

В современных реалиях создание пищевых продуктов функциональной направленности является стремительно растущей сферой производства. Для получения продукции с заданными свойствами с помощью добавления ингредиентов растительного происхождения необходимо учитывать строение веществ, основные биохимические особенности для определения основного направления обогащения. При выборе методов экстракции и анализа БАВ из растительного сырья важно учитывать безопасность технологии и стабильность извлекаемых соединений. Оптимизация этих методов позволяет минимизировать потери выхода БАВ.

Повышение стабильности и биодоступности ингредиентов с помощью верно подобранных методов количественного анализа экстрагированных БАВ позволяют соотносить структуру соединения, функциональную активность, реакционную способность. Все эти аспекты играют ключевую роль при создании продуктов функциональной и специализированной направленности и являются перспективными направлениями исследований с учетом непрерывного развития и модернизации методов выделения и анализа биологически активных веществ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / REFERENCES

1. Carpena, M., da Pereira, R., Garcia-Perez, P., Otero, P., Soria-Lopez, A., Chamorro, F. et al. (2022). An Overview of Food Bioactive Compounds and Their Properties Chapter in a book: *Membrane Separation of Food Bioactive Ingredients* Springer, Cham, 2022. https://doi.org/10.1007/978-3-030-84643-5_2
2. Ferdes, M. (2018). Antimicrobial compounds from plants. Chapter in a book *Fighting Antimicrobial Resistance*. IAPC Publishing, Zagreb, Croatia, 2018. <https://doi.org/10.5599/obp.15.15>
3. Rawat, P., Singh, Y., Bisht, M., Pal, M. (2023). Modern Analytical Techniques for Extraction, Purification, and Structural Characterization of Microbial Bioactive Compounds. Chapter in a book: *Microbial Bioactive Compounds*. Springer, Cham, 2023. https://doi.org/10.1007/978-3-031-40082-7_5
4. Daliri, E. B., Lee, B. H., Oh, D. H. (2017). Current trends and perspectives of bioactive peptides. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 58(13), 2273–2284. <https://doi.org/10.1080/10408398.2017.1319795>
5. Mollica, A., Costante, R., Stefanucci, A., Novellino, E. (2015). Cyclotides: A natural combinatorial peptide library or a bioactive sequence player? *Journal of Enzyme Inhibition and Medicinal Chemistry*, 30(4), 575–580. <https://doi.org/10.3109/14756366.2014.954108>
6. Rahman, M. M., Rahaman, M. S., Islam, M. R., Rahman, F., Mithi, F. M., Alqahtani, T. et al. (2022). Role of phenolic compounds in human disease: Current knowledge and future prospects. *Molecules*, 27(1), Article 233. <https://doi.org/10.3390/molecules27010233>
7. Zhang, Y., Cai, P., Cheng, G., Zhang, Y. (2022). A brief review of phenolic compounds identified from plants: Their extraction, analysis, and biological activity. *Natural Product Communications*, 17(1), 1–14. <https://doi.org/10.1177/1934578X211069721>
8. Капустин, М. А., Чубарова, А. С., Головач, Т. Н., Цыганков, В. Г., Бондарук, А. М., Курченко, В. П. (2016). Методы получения нанокмешек биологически активных веществ с циклическими олигосахаридами, анализ их физико-химических свойств и использование в пищевом производстве. *Труды Белорусского государственного университета. Серия: физиологические, биохимические и молекулярные основы функционирования биосистем*, 11(1), 73–100. [Kapustin, M. A., Chubarova, A. S., Halavatch, T. N., Cigankov, V. G., Bondaruk, A. M., Kurchenko, V. P. (2016). Methods of active compounds with cyclic oligosaccharides nanocomplexes obtaining, analysis of it physical and chemical properties and use in food production. *Proceedings of the Belarusian State University. Series of Physiological, Biochemical and Molecular Biology Sciences*, 11(1), 73–100. (In Russian)]
9. Tanase, C., Coșarcă, S., Muntean, D.-L. (2019). A critical review of phenolic compounds extracted from the bark of woody vascular plants and their potential biological activity. *Molecules*, 24(6), Article 1182. <https://doi.org/10.3390/molecules24061182>
10. Mendonça, E. L. S. S., Xavier, J. A., Fragoso, M. B. T., Silva, M. O., Escodro, P. B., Oliveira, A. C. M. et al. (2024). E-Stilbenes: General chemical and biological aspects, potential pharmacological activity based on the Nrf2 pathway. *Pharmaceuticals*, 17(2), Article 232. <https://doi.org/10.3390/ph17020232>
11. Bonnefont-Rousselot, D. (2016). Resveratrol and cardiovascular diseases. *Nutrients*, 8(5), Article 250. <https://doi.org/10.3390/nu8050250>
12. Braun, C., Dohlen, S., Ilg, Y., Brodtkorb, F., Fischer, B., Heindirk, P. et al. (2017). Antimicrobial activity of intrinsic antimicrobial polymers based on poly((tert-butyl-amino)-methyl-styrene) against selected pathogenic and spoilage microorganisms relevant in meat processing facilities. *Journal of Antimicrobial Agents*, 3(1), Article 136. <https://doi.org/10.4172/2472-1212.1000136>
13. Al-Khayri, J. M., Sahana, G. R., Nagella, P., Joseph, B. V., Alessa, F. M., Al-Mssallem, M. Q. (2022). Flavonoids as potential anti-inflammatory molecules: A review. *Molecules*, 27(9), Article 2901. <https://doi.org/10.3390/molecules27092901>
14. Tian, C., Liu, X., Chang, Y., Wang, R., Lv, T., Cui, C. et al. (2021). Investigation of the anti-inflammatory and antioxidant activities of luteolin, kaempferol, apigenin, and quercetin. *South African Journal of Botany*, 137, 257–264. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2020.10.022>
15. Ku, Y.-S., Ng, M.-S., Cheng, S.-S., Lo, A. W.-Y., Xiao, Z., Shin, T.-S. et al. (2020). Understanding the composition, biosynthesis, accumulation, and transport of flavonoids in crops for the promotion of crops as healthy sources of flavonoids for human consumption. *Nutrients*, 12(6), Article 1717. <https://doi.org/10.3390/nu12061717>
16. Виноградова, М. Г. (2021). УФ-спектральный анализ растительного сырья ландшафта майского. *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*, 2(10), 95–102. [Vinogradova, M. G. (2021). UV-spectral analysis of plant raw materials may lily of the valley. *Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical Engineering and Chemical Technology»*, 2(10), 95–102. (In Russian)] <https://doi.org/10.46573/2658-7459-2021-95-102>
17. Ražná, K., Nžžková, J., Vargaová, A., Harenčár, L., Bjelková, M. (2021). Biological functions of lignans in plants. *Agriculture*, 67(3), 155–165. <https://doi.org/10.2478/agri-2021-0014>
18. Капустин, М. А., Чубарова, А. С., Лодыгин, А. Д., Ржепаковский, И. В., Дудчик, Н. В., Цыганков, В. Г. и др. (2025). Технология получения нанокмешек куркуминоидов с циклодекстринами, исследование их свойств и биологической активности. *Экспериментальная биология и биотехнология*, 1, 24–39. [Kapustin, M. A., Chubarova, H. S., Lodygin, A. D., Rzhepakovsky, I. V., Dudchik, N. V., Tsygankow V. G. et al. (2025). Technology for nanocomplexes of curcuminoids with cyclodextrins production, investigation of their properties and biological activity. *Experimental Biology and Biotechnology*, 1, 24–39. (In Russian)]
19. Gori, A., Boucherle, B., Rey, A., Rome, M., Fuzzati, N., Peuchmaur, M. (2021). Development of an innovative maceration technique to optimize extraction and phase partition of natural products. *Fitoterapia*, 148, Article 104798. <https://doi.org/10.1016/j.fitote.2020.104798>
20. Hidayat, R., Wulandari, P. (2021). Methods of extraction: Maceration, percolation, and decoction. *Eureka Herba Indonesia*, 2(1), 68–74. <https://doi.org/10.37275/ehi.v2i1.15>
21. Oritz-Kreher, K., Huber, J. (2023). Twelve Essential Oils of the Bible: Ancient Healing Oils and Their Contemporary Uses. Simon and Schuster, 2023.
22. Stratakis, A. C., Koidis, A. (2016). Methods for Extracting Essential Oils. Chapter in a book: *Essential Oils in Food Preservation, Flavor and Safety*. Academic Press, 2016. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-416641-7.00004-3>
23. Azmir, J., Zaidul, I. S. M., Rahman, M. M., Sharif, K. M., Mohamed, A., Sahena, F. et al. (2013). Techniques for extraction of bioactive compounds from plant materials: A review. *Journal of Food Engineering*, 117(4), 426–436. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.01.014>
24. Tăbărașu, A.-M., Nenciu, F., Anghelache, D.-N., Vlăduț, V.-N., Găgeanu, I. (2024). Hybrid percolation-ultrasound method for extracting bioactive compounds from *Urtica dioica* and *Salvia officinalis*. *Agriculture*, 14(9), Article 1561. <https://doi.org/10.3390/agriculture14091561>
25. Дубашинская, Н. В., Хишова, О. М., Шимко, О. М. (2007). Характеристика способов получения экстрактов и их стандартизация (часть II). *Вестник фармации*, 36(2), 70–79. [Dubashinskaya, N. V., Khishova, O. M., Shimko, O. M. (2007). Characteristics of methods of extract production and their standardization (part II). *Pharmacy Herald*, 36(2), 70–79. (In Russian)]
26. Soxhlet, F. (1879). Die gewichtsanalytische Bestimmung des Milchfettes. *Dingler's Polytechnisches Journal*, 232, 461–465. (In German)
27. de Castro, M. D. L., Priego-Capote, F. (2010). Soxhlet extraction: Past and present panacea. *Journal of Chromatography A*, 1217(16), 2383–2389. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2009.11.027>
28. Naviglio, D., Scarano, P., Ciaravolo, M., Gallo, M. (2019). Rapid solid-liquid dynamic extraction (RSLDE): A powerful and greener alternative to the latest solid-liquid extraction techniques. *Foods*, 8(7), Article 245. <https://doi.org/10.3390/foods8070245>
29. Khan, S., Aslam, R., Makroo, H. (2018). High pressure extraction and its application in the extraction of bioactive compounds: A review. *Journal of Food Process Engineering*, 42(1), Article e12896. <https://doi.org/10.1111/jfpe.12896>
30. Herrero, M., Mendiola, J. A., Cifuentes, A., Ibáñez, E. (2010). Supercritical fluid extraction: Recent advances and applications. *Journal of Chromatography A*, 1217(16), 2495–2511. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2009.12.019>
31. Dumitrah, P. G., Bologa, M. K., Shemyakova, T. D. (2016). Ultrasound-assisted extraction of biologically active substances from tomato seeds. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 52(3), 270–275. <https://doi.org/10.3103/S1068375516030054>

32. Wang, C., Zhang, W., Liao, Y., Ye, J., Xu, F., Wang, Q. (2025). Ginkgo biloba flavonoids: Analysis of functions, regulatory mechanisms, and extraction. *Plant Biology*, 27(6), 962–974. <https://doi.org/10.1111/plb.70054>
33. Routray, W., Orsat, V. (2012). Microwave-assisted extraction of flavonoids: A review. *Food and Bioprocess Technology*, 5(3), 409–424. <https://doi.org/10.1007/s11947-011-0573-z>
34. Naliyadhara, N., Kumar, A., Girisa, S., Daimary, U. D., Hegde, M., Kunnumakara, A. B. (2022). Pulsed electric field (PEF): Avant-garde extraction escalation technology in food industry. *Trends in Food Science and Technology*, 122, 238–255. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2022.02.019>
35. Sharma, H. P., Patel, H., Sugandha (2017). Enzymatic added extraction and clarification of fruit juices — A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 57(6), 1215–1227. <https://doi.org/10.1080/10408398.2014.977434>
36. Verep, D., Ates, S., Karaoğlu, E. (2023). A review of extraction methods for obtaining bioactive compounds in plant-based raw materials. *Bartın Orman Fakültesi Dergisi*, 25(3), 492–513.
37. Singh, S., Verma, D. K., Thakur, M., Tripathy, S., Patel, A. R., Shah, N. et al. (2021). Supercritical fluid extraction (SCFE) as green extraction technology for high-value metabolites of algae, its potential trends in food and human health. *Food Research International*, 150(Part A), Article 110746. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2021.110746>
38. Matsumoto, H., Nakamura, Y., Hirayama, M., Yoshiki, Y., Okubo, K. (1999). Antioxidant activity of black currant anthocyanin aglycons and their glycosides measured by chemiluminescence in a neutral pH region and in human plasma. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 50(18), 5034–5037. <https://doi.org/10.1021/jf020292i>
39. Патент № 2554002. Способ количественного определения антоцианов в лекарственном растительном сырье. Куркин, В. А., Рязанова, Т.К., Куркина, А. В., Егорова, А. В. Опубл. 20.06.2015. Бюлл. № 21. [Kurkin, V. A., Ryzanova, T. K., Kurkina, A. V., Egorova, A. V. Method for measuring anthocyanes in crude drugs. Patent RF, no. 2554002, 2015. (In Russian)]
40. Eftekhari, M., Alizadeh, M., Ebrahimi, P. (2012). Evaluation of the total phenolics and quercetin content of foliage in mycorrhizal grape (*Vitis vinifera* L.) varieties and effect of postharvest drying on quercetin yield. *Industrial Crops and Products*, 38, 160–165. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2012.01.022>
41. Пономарев, С. В., Зотов, А. Н., Гвоздкова, О. Н., Мальцев, А. Ю., Воронцов, Д. В. (2024). Фитохимические компоненты и промышленное применение виноградных косточек. Краткий обзор мировых исследований. *Эффективное животноводство*, 1(191), 70–73. [Ponomarev, S. V., Zotov, A. N., Gvozdkova, O. N., Maltstv, A. Yu., Voronov, D. V. (2024). Phytochemical components and industrial application of grape seeds. A brief review of world research. *Efficient Animal Husbandry*, 1(191), 70–73. (In Russian)]
42. Houldsworth, A. (2024). Role of oxidative stress in neurodegenerative disorders: A review of reactive oxygen species and prevention by antioxidants. *Brain Communications*, 6(1), Article fcd356. <https://doi.org/10.1093/braincomms/fcd356>
43. Wang, D., Xiao, H., Lyu, X., Chen, H., Wei, F. (2023). Lipid oxidation in food science and nutritional health: A comprehensive review. *Oil Crop Science*, 8(1), 35–44. <https://doi.org/10.1016/j.ocsci.2023.02.002>
44. Pisoschi, A. M., Pop, A. (2015). The role of antioxidants in the chemistry of oxidative stress: A review. *European Journal of Medicinal Chemistry*, 97, 55–74. <https://doi.org/10.1016/j.ejmech.2015.04.040>
45. Cordiano, R., Di Gioacchino, M., Mangifesta, R., Panzera, C., Gangemi, S., Minciullo, P. L. (2023). Malondialdehyde as a potential oxidative stress marker for allergy-oriented diseases: An update. *Molecules*, 28(16), Article 5979. <https://doi.org/10.3390/molecules28165979>
46. Jiménez-Morales, W. A., Cañizares-Macias, M. D. P., Pedraza-Chaverri, J. (2022). Fast ORAC-SIA method for antioxidant capacity determination in food samples. *Food Chemistry*, 384, Article 132524. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.132524>
47. Яшин, А. Я., Веденин, А. Н., Яшин, Я. И., Немзер, Б. В. (2019). Ягоды: химический состав, антиоксидантная активность. Влияние потребления ягод на здоровье человека. *Аналитика*, 9(3), 222–231. [Yashin, A. Ya., Vedenin, A. N., Nemzer, B. V., Yashin, Ya. I. (2019). Berries: Chemical composition, antioxidant activity. Impact of consumption of berries on health of the person. *Analytics*, 9(3), 222–231. (In Russian)] <https://doi.org/10.22184/2227-572X.2019.9.3.222.230>
48. Apak, R., Gorinstein, S., Böhm, V., Schaich, K. M., Özyürek, M., Güçlü, K. (2013). Methods of measurement and evaluation of natural antioxidant capacity/activity (IUPAC Technical Report). *Pure and Applied Chemistry*, 85(5), 957–998. <https://doi.org/10.1351/PAC-REP-12-07-15>
49. Speisky, H., Lopez-Alarcon, C., Gomez, M., Fuentes, J., Sandoval-Acuna, C. (2012). First web-based database on total phenolics and oxygen radical absorbance capacity (ORAC) of fruits produced and consumed within the south Andes region of South America. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 60(36), 8851–8859. <https://doi.org/10.1021/jf205167k>
50. Atala, E., Vásquez, L., Speisky, H., Lissi, E., López-Alarcón, C. (2009). Ascorbic acid contribution to ORAC values in berry extracts: An evaluation by the ORAC-pyrogallol red methodology. *Food Chemistry*, 113(1), 331–335. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.07.063>
51. Ninfali, P., Chiarabini, A., Angelino, D. (2014). The ORAC/kcal ratio qualifies nutritional and functional properties of fruit juices, nectars, and fruit drinks. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 65(6), 708–712. <https://doi.org/10.3109/09637486.2014.918591>
52. Atala, E., Aspée, A., Speisky, H., Lissi, E., López-Alarcón, C. (2013). Antioxidant capacity of phenolic compounds in acidic medium: A pyrogallol red-based ORAC (oxygen radical absorbance capacity) assay. *Journal of Food Composition and Analysis*, 32(2), 116–125. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2013.09.007>
53. Yiasmin, N., Waleed, A. L.-A., (2021). Recent applications of HPLC in food analysis: A mini review. *International Journal of Advanced Engineering, Management and Science*, 7(5), 01–06. <http://doi.org/10.22161/ijaems.75.1>
54. Esmail, L. A., Jabbar, H. S. (2023). Encapsulation of amaranth CDs at ZIF-7 MOFs as a novel adsorbent for ultrasonic-assisted dispersive nano-solid-phase microextraction and ultrasensitive determination of *Allura red* in food samples. *Microchemical Journal*, 195, Article 109474. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2023.109474>
55. Baruah, B., Gabriel, G. J., Akbashev, M. J., Booher, M. E. (2013). Facile synthesis of silver nanoparticles stabilized by cationic polynorbornenes and their catalytic activity in 4-nitrophenol reduction. *Langmuir*, 29(13), 4225–4234. <https://doi.org/10.1021/la305068p>
56. Malik, A., Nath, M. (2020). Synthesis of Ag/ZIF-7 by immobilization of Ag nanoparticles onto ZIF-7 microcrystals: A heterogeneous catalyst for the reduction of nitroaromatic compounds and organic dyes. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(6), Article 104547. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104547>
57. Goźiażak, R., Drużyńska, B., Derewiaka, D., Piecyk, M., Majewska, E., Ciecierska, M. et al. (2022). Verification of the conditions for determination of antioxidant activity by ABTS and DPPH assays — A practical approach. *Molecules*, 27(1), Article 50. <https://doi.org/10.3390/molecules27010050>
61. Re, R., Pelligrini, N., Proteggente, A., Pannala, A., Yang, M., Rice-Evans, C. (1999). Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation decolorization assay. *Free Radical Biology and Medicine*, 26(9–10), 1231–1237. [https://doi.org/10.1016/S0891-5849\(98\)00315-3](https://doi.org/10.1016/S0891-5849(98)00315-3)
62. Brand-Williams, W., Cuvelier, M. E., Berset, C. (1995). Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. *LWT — Food Science and Technology*, 28(1), 25–30. [https://doi.org/10.1016/S0023-6438\(95\)80008-5](https://doi.org/10.1016/S0023-6438(95)80008-5)
63. Brusotti, G., Cesari, I., Dentamaro, A., Caccialanza, G., Massolini, G. (2014). Isolation and characterization of bioactive compounds from plant resources: The role of analysis in the ethnopharmacological approach. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, 87, 218–228. <https://doi.org/10.1016/j.jpba.2013.03.007>
64. Tzanova, M., Atanasov, V., Yaneva, Z., Ivanova, D., Dinev, T. (2020). Selectivity of current extraction techniques for flavonoids from plant materials. *Processes*, 8(10), Article 1222. <https://doi.org/10.3390/pr8101222>
65. Алексеенко, Е. В., Бакуменко, О. Е., Азарова, М. М., Исабаев, И. Б., Курбанов, М. Т. (2019). Влияние предварительной обработки ягод клюквы на экстракцию антоциановых пигментов, выход сока и его антиоксидантную активность. *Хранение и переработка сельхозсырья*, 4, 10–27. [Alekseenko, E. V., Bakumenko, O. E., Azarova, M. M., Isabayev, I. B., Kurbanov, M. T. (2019). The influence of pre-processing of berries cranberries on the extraction of anthocyanin pigments, the yield of juice and its antioxidant activity. *Storage and Processing of Farm Products*, 4, 10–27. (In Russian)] <https://doi.org/10.36107/spfp.2019.200>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ	AUTHOR INFORMATION
Принадлежность к организации	Affiliation
Березина Елизавета Александровна — аспирант, факультет биотехнологий, Национальный исследовательский университет ИТМО 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр-т, 49 E-mail: berezina2508@gmail.com, ORCID: http://orcid.org/0009-0007-2472-0220	Elizaveta A. Berezina , Graduate Student, Faculty of Biotechnologies, ITMO University 49, Kronverksky Ave, Saint Petersburg, 197101, Russia E-mail: berezina2508@gmail.com, ORCID: http://orcid.org/0009-0007-2472-0220
Кийски Виталина Дмитриевна — аспирант, факультет биотехнологий, Национальный исследовательский университет ИТМО 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр-т, 49 E-mail: vdkiiiski@itmo.ru ORCID: https://orcid.org/0009-0001-7343-3451	Vitalina D. Kiiski , Graduate Student, Faculty of Biotechnologies, ITMO University 49, Kronverksky Ave, Saint Petersburg, 197101, Russia E-mail: vdkiiiski@itmo.ru ORCID: https://orcid.org/0009-0001-7343-3451
Казанкин Никита Алексеевич — аспирант, факультет биотехнологий, Национальный исследовательский университет ИТМО 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр-т, 49 E-mail: nikita300iq@yandex.ru ORCID: http://orcid.org/0009-0001-2046-2523 * автор для контактов	Nikita A. Kazankin , Graduate Student, Faculty of Biotechnologies, ITMO University 49, Kronverksky Ave, Saint Petersburg, 197101, Russia E-mail: nikita300iq@yandex.ru ORCID: http://orcid.org/0009-0001-2046-2523 * corresponding author
Кригер Ольга Владимировна — доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник, факультет биотехнологий, Национальный исследовательский университет ИТМО 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр-т, 49 E-mail: ovkriger@itmo.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1489-0716	Olga V. Kriger , Doctor of Technical Sciences, Professor, Leading Principal Researcher, Faculty of Biotechnologies, ITMO University 49, Kronverksky Ave, Saint Petersburg, 197101, Russia E-mail: ovkriger@itmo.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1489-0716
Яковченко Наталья Владимировна — кандидат технических наук, доцент, научный сотрудник, факультет биотехнологий, Национальный исследовательский университет ИТМО 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр-т, 49 E-mail: nviakovchenko@itmo.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5188-5916	Natalia V. Iakovchenko , Candidate of Technical Sciences, Docent, Researcher, Faculty of Biotechnologies, ITMO University 49, Kronverksky Ave, Saint Petersburg, 197101, Russia E-mail: nviakovchenko@itmo.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5188-5916
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/10.21323/2618-9771-2025-8-4-524-532>



Поступила 24.03.2025

Поступила после рецензирования 18.11.2025

Принята в печать 21.11.2025

© Луткова Н. Ю., Иванова Е. В., Червяк С. Н., Лутков И. П., 2025

<https://www.fsjour.com/jour>

Научная статья

Открытый доступ

ВЛИЯНИЕ СПОСОБА ХРАНЕНИЯ ДРОЖЖЕЙ НА КАЧЕСТВО МОЛОДЫХ ИГРИСТЫХ ВИН

Луткова Н. Ю., Иванова Е. В., Червяк С. Н.*, Лутков И. П.

Всероссийский национальный научно-исследовательский институт виноградарства и виноделия «Магарах»
Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Ялта, Россия

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: АННОТАЦИЯ

субкультивирование,
глубокая заморозка,
бродильная
активность,
органолептические
свойства, пенные
свойства, игристые
свойства, диоксид
углерода

Для выработки качественных игристых вин необходимо использовать чистую культуру дрожжей вида *Saccharomyces cerevisiae*, способных сбраживать сахара при повышенном давлении CO₂ и отличающихся холодоустойчивостью и спиртоустойчивостью. Технологические свойства дрожжей должны сохраняться независимо от условий хранения культуры. Цель исследования — изучение физико-химических и органолептических свойств игристых вин, выработанных из винограда сорта Мускат белый с использованием штаммов дрожжей Севастопольская 23 (I-525) и Ленинградская (I-307). Указанные штаммы хранились в коллекции микроорганизмов виноделия «Магарах» методом субкультивирования и криоконсервации. В исследовании использовали методы, общепринятые в микробиологии виноделия и энохимии. В результате проведенных исследований существенного влияния условий хранения культур дрожжей на их морфолого-культуральные признаки не выявлено. Штаммы сохранили форму и размеры клеток, характер осадка, фенотип, способность к образованию кольца и спорообразованию. Значительных различий в процессе брожения суслу при 26 ± 1 °C с использованием исследуемых штаммов выявлено не было. При этом брожение на штамме I-525 проходило плавно, а на I-307 — ступенчато. Установлена стабильная устойчивость исследуемых штаммов дрожжей к изменению отдельных абиотических факторов. Брожение суслу при температуре 15–18 °C на штамме I-525 проходило значительно быстрее (на 5–21 день), чем на I-307. Образцы игристых вин, полученные с использованием штамма дрожжей I-307, отличались более высоким давлением CO₂ (на 9–21 %) и содержанием связанных форм CO₂ (на 18,5–20,3 %), а также значением коэффициента игристых свойств (K > 100) и лучшей устойчивостью пены (более 60 с). Метод хранения культуры дрожжей путем криоконсервации обеспечивает сохранение их основных морфолого-культуральных и технологических свойств при низких трудозатратах, что обуславливает целесообразность его применения для продолжительного хранения микроорганизмов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Работа выполнена в рамках государственного задания по теме № FNZM-2024-0001.

Received 24.03.2025

Accepted in revised 18.11.2025

Accepted for publication 21.11.2025

© Lutkova N. Yu., Ivanova E. V., Chervyak S. N., Lutkov I. P., 2025

Available online at <https://www.fsjour.com/jour>

Original scientific article

Open access

THE EFFECT OF THE YEAST STORAGE METHOD ON THE QUALITY OF YOUNG SPARKLING WINES

Nataliya Yu. Lutkova, Elena V. Ivanova, Sofiya N. Chervyak*, Igor P. Lutkov

All-Russian National Research Institute of Viticulture and Winemaking “Magarach”
of the National Research Centre “Kurchatov Institute”, Yalta, Russia

KEYWORDS:

subcultivation, deep
freezing, fermentation
activity, organoleptic
properties, foamy
properties, sparkling
properties, carbon
dioxide

ABSTRACT

For the production of high-quality sparkling wines it is necessary to use pure yeast culture of *Saccharomyces cerevisiae* species, which is able to ferment sugars at elevated CO₂ pressure and is characterized by cold and alcohol resistance. Technological properties of the yeast should be preserved regardless of the storage conditions of the culture. The aim of the research was to study the physicochemical and organoleptic properties of sparkling wines produced from white Muscat grapes using yeast strains ‘Sevastopolskaya 23’ (I-525) and ‘Leningradskaya’ (I-307) stored in the collection of microorganisms of winemaking “Magarach” by subcultivation and cryopreservation. The study used generally accepted methods of microbiology and enochemistry of wine. As a result of the studies, no significant influence of the storage conditions of the yeast cultures on their morphological and cultural characteristics was revealed. The strains retained their cell shape and size, unchanged sediment character, strain phenotype, ability to form a ring and spores. No significant differences were found in the process of must fermentation at 26 ± 1 °C using the studied strains. At the same time, fermentation with the strain I-525 was smooth, and with the strain I-307 — stepwise. Stable resistance of the studied yeast strains to changes in some abiotic factors was found. Fermentation of must at a temperature of 15–18 °C with the strain I-525 was much faster (5–21 days) than with I-307. The sparkling wine samples obtained with the yeast strain I-307 were characterized by higher CO₂ pressure (by 9–21 %) and content of bound forms of CO₂ (by 18.5–20.3 %), as well as by the value of the coefficient of sparkling properties (K > 100) and better foam stability (more than 60 s). The method of storing yeast cultures by cryopreservation ensures the preservation of their basic morphological, cultural and technological properties at low labor costs, which makes it advisable to use it for long-term storage of microorganisms.

FUNDING: The work was conducted under state assignment No. FNZM-2024-0001.

1. Введение

Производство высококачественных вин основывается на брожении виноградного суслу с использованием селекционных штаммов дрожжей. Благодаря высокой надежности ферментации штаммы

Saccharomyces cerevisiae являются основным видом дрожжей, применяемых для проведения спиртового брожения. Использование коммерческих культур позволяет стабильно производить качественные вина преимущественно без индивидуальных различий [1]. На сегод-

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Луткова, Н. Ю., Иванова, Е. В., Червяк, С. Н., Лутков, И. П. (2025). Влияние способа хранения дрожжей на качество молодых игристых вин. *Пищевые системы*, 8(4), 524–532. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-4-524-532>

FOR CITATION: Lutkova, N. Yu., Ivanova, E. V., Chervyak, S. N., Lutkov, I. P. (2025). The effect of the yeast storage method on the quality of young sparkling wines. *Food Systems*, 8(4), 524–532. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-4-524-532>

няшний день исследователи из разных стран занимаются поиском штаммов дрожжей, обладающих широким спектром новых энологических свойств, способных придавать вину необходимые характеристики и удовлетворять любые запросы самых требовательных потребителей. В частности, многие научные работы посвящены селекции и исследованию автохтонных штаммов дрожжей *S. cerevisiae*, обладающих хорошей бродильной способностью и обеспечивающих получение узнаваемой высококачественной продукции [2,3]. Кроме того, использование местных штаммов дрожжей является важной составляющей при производстве терруарных вин [4,5].

Вместе с тем производство качественной и безопасной винопродукции требует применения штаммов дрожжей с постоянными технологическими свойствами, на которые не должны влиять условия хранения культуры [6,7]. Коллекция чистых культур дрожжей и других микроорганизмов виноделия играет ключевую роль в развитии отрасли. В ней поддерживаются в жизнеспособном состоянии расы (штаммы) с сохраненными технологически значимыми свойствами, что позволяет рекомендовать их для производства различных типов вин и обеспечивает возможность дальнейшего пополнения промышленно ценными культурами [8,9]. Основная сложность, с которой сталкиваются работники микробиологических коллекций — необходимость длительного поддержания чистых культур в жизнеспособном состоянии. В последнее время для сохранения культур микроорганизмов используют много методов, таких как хранение при низких температурах (замораживание или охлаждение), лиофильная сушка, хранение под минеральным маслом, хранение на адсорбенте и др. [10,11].

Метод субкультивирования (хранения на питательных средах, или метод перевиваемых культур) предполагает перенос небольшого количества дрожжевой культуры в пробирку на свежую стерильную питательную среду (виноградное сусло, виноматериал с глюкозой). Перенос проводится 1–2 раза в 12 месяцев с последующим термостатированием при температуре (26 ± 1) °C и инкубированием в течение 3–5 суток до появления признаков активного брожения [12,13]. После этого пробирку хранят в холодильнике при температуре (10 ± 1) °C. Сроки пересева для штаммов определяют скоростью высыхания среды, что, в свою очередь, зависит от температуры и влажности холодильной камеры, где хранятся культуры. Также при многократных пересевах повышается вероятность потери активности микроорганизмов и подверженность спонтанным мутациям, в результате чего могут возникнуть новые формы с отличительными признаками [14].

Второй, более современный способ хранения микроорганизмов — это криоконсервация, основанная на переводе клеток микроорганизмов в состояние анабиоза путем воздействия низких температур (от минус 80 ± 1 °C и ниже) [15,16]. К факторам, влияющим на сохранение жизнеспособности и биотехнологических свойств промышленно ценных штаммов дрожжей, относятся температура хранения исследуемых штаммов, скорость заморозки биоматериала, наличие криопротектора, возраст культуры [17,18]. Выживаемость и бродильная активность дрожжей штамма *S. cerevisiae*, замороженных в стационарной фазе роста при использовании 15–30 % глицерина, к концу срока хранения составляет соответственно 99,8 и 77,9 %.

Способ хранения микроорганизмов путем криоконсервации снижает риск генетических изменений, обеспечивает сохранение их жизнеспособности, генетической стабильности, заявленных физиолого-биохимических свойств и чистоты культуры, уменьшает временные и материальные затраты [19,20]. Данный способ хранения культуры позволяет использовать замороженные образцы в качестве прямого инокулянта [21,22].

Лиофилизация — это простой способ сохранить большое количество жизнеспособных микроорганизмов в порошкообразной форме [23,24]. Она относится к долгосрочным методам хранения и применяется для консервации многих видов бактерий и грибов в крупных коллекциях. Принцип метода заключается в высушивании клеток дрожжей из замороженного состояния (сублимационная сушка) под вакуумом без перехода в жидкую фазу [10,25]. Для дрожжей при лиофилизации обычно применяют охлаждение при температурах от минус 30 °C до минус 70 °C. При этом температура около минус 15 °C, способствующая медленному замораживанию, дает наилучшие результаты [26]. Запаянные ампулы с лиофилизированными культурами хранят в темноте при комнатной температуре или в холодильнике с температурой 4–6 °C.

Такие культуры могут сохраняться в жизнеспособном состоянии в течение нескольких десятилетий. Недостатком этого способа является невозможность визуального контроля за жизнеспособностью культуры. Кроме того, не все виды дрожжей выдерживают процесс лиофилизации, что приводит к повреждению клеток, к их гибели

или к технологическому ухудшению качества, а при длительном хранении лиофилизированных культур могут происходить существенные изменения в их метаболизме [24,27]. Также было показано, что данный способ более эффективный в отношении дрожжей с мелкими клетками и аскоспорами, таких как *Pichia*, *Hansenula* и *Debaryomyces*. При этом крупноклеточные слабоспорулирующие или неспорулирующие дрожжи рода *Saccharomyces*, *Kluyveromyces*, *Dekkera* и *Brettanomyces* показали более низкую выживаемость [10].

В последнее время все чаще применяется еще один способ длительного хранения культур микроорганизмов — замораживание в жидком азоте. Замороженные в ампулах культуры хранятся в специальных контейнерах-рефрижераторах с жидким азотом при температуре минус 196 °C. Данный способ обеспечивает сохранение жизнеспособных культур дрожжей в течение практически неограниченного времени [13].

При хранении под минеральным маслом активность дрожжей снижается. Вместе с тем в работе [22] была показана возможность хранения культур дрожжей при комнатной температуре на агаризованных средах в стеклянных пробирках для реагентов, закрытых вазпаром (*vaspar*) и закрытых ватными пробками. Однако из 60 образцов удалось восстановить лишь треть.

Известно, что при длительном хранении культур дрожжей в коллекциях, отличающихся от природных и производственных, некоторые их свойства ослабевают или даже утрачиваются, например, способность к образованию зернистого осадка, спорообразованию, фенотип и некоторые другие [28,29].

Коллекция культур дрожжей для виноделия является важным фактором в развитии производства высококачественных вин, поскольку в ней в особых условиях сохраняются в жизнеспособном состоянии штаммы, обладающие необходимыми технологическими свойствами. При длительном хранении в коллекции чистых культур микроорганизмов и, в частности, дрожжей, важно сохранять присутствие им особенности штамма.

Стабильное пополнение коллекционного фонда микроорганизмов и его сохранение становится все более трудоемкой задачей, что обуславливает необходимость поиска эффективных способов хранения культур. Коллекция микроорганизмов виноделия «Магарач» (КМВ «Магарач») [17] является одной из самых обширных по количеству культур, содержит более 700 штаммов сахаромикетов, хранение которых осуществляется как методом субкультивирования, так и методом глубокой заморозки.

Целью настоящей работы являлось изучение физико-химических и органолептических свойств молодых игристых вин, полученных с использованием штаммов дрожжей, заложенных на хранение в коллекцию «Магарач» методом субкультивирования и криоконсервации.

2. Объекты и методы

2.1. Объекты исследований

Исследования проводили в лаборатории микробиологии на базе НИЦ «Курчатовский институт» — «Магарач». При проведении исследований были использованы подходы и методы, общепринятые в микробиологии виноделия и энохимии.

В качестве объектов исследования было выбрано 2 промышленно-ценных штамма дрожжей Севастопольская 23 (I-525) и Ленинградская (I-307), рекомендуемых для производства тихих и игристых вин, длительное время хранящихся в коллекции КМВ «Магарач» (Таблица 1) [17] как способом субкультивирования (С), так и способом глубокой заморозки (Т) при температуре (минус 81 ± 1 °C).

Метод субкультивирования штаммов дрожжей осуществляется путем пересевов (переноса выращенных микроорганизмов на свежую стерильную питательную среду (виноградное сусло) дрожжевых культур КМВ «Магарач» 1 раз в 12 месяцев для сохранения их жизнеспособности с соблюдением требований стерильности. После посева пробирку помещают в термостат ТС-1/80 (ОАО «Смоленское СКТБ СПУ», Россия) и инкубируют при температуре (26 ± 1) °C в течение 3–5 суток до появления признаков активного брожения. Затем пробирку хранят в холодильнике при температуре (10 ± 1) °C.

При закладке штаммов на хранение при низких температурах (минус 81 ± 1 °C) для инокуляции использовали 2–3-х суточную дрожжевую разводку в физиологически активном состоянии, которое оценивали в соответствии с требованиями, принятыми в виноделии: количество клеток — $60\text{--}80$ млн/см³; количество почкующихся клеток — не менее 30%; мертвых — не более 2%. Готовую дрожжевую разводку микробиологической петлей (1–2 петли) пересевали в пробирку с питательной средой YPD (г/л, глюкоза — 20, пептон — 20, дрожжевой экстракт — 10; «Диаэм», Россия) и инкубировали

в течение 1–3 суток в термостате при температуре ($26 \pm 1^\circ\text{C}$) до появления признаков активного брожения. Затем при помощи автоматического дозатора в пробирку с накопительной культурой вносили глицерин («Диаэм», Россия) (криопротектор) в количестве 30 %. Тщательно перемешивали пипетированием. Автоматическим дозатором разливали полученную смесь в криопробирки и/или эпипендорфы не менее чем в 3-х повторностях. Криостатив помещали на хранение в морозильную камеру MDF-U33V (Panasonic, Япония) при температуре минус $81 \pm 1^\circ\text{C}$.

Таблица 1. Характеристика промышленно ценных штаммов дрожжей
Table 1. Characteristics of industrially valuable yeast strains

Вариант опыта	Коллекционный № штамма	Название	Условия хранения	Технологические особенности
I-525 «С»	I-525	Севастопольская 23	субкультивирование	чувствительная, спиртоустойчивая, кислотоустойчивая; хорошо сбраживает виноградное сусло при низких температурах
I-525 «Т»			глубокая заморозка	
I-307 «С»	I-307	Ленинградская	субкультивирование	чувствительная, спиртоустойчивая, кислотоустойчивая; сбраживает виноградное сусло в широком диапазоне температур ($18-30^\circ\text{C}$).
I-307 «Т»			глубокая заморозка	

Дрожжи, независимо от способа хранения, перед проведением экспериментов активировали посевами и предварительно перенесли на виноградное сусло (не менее трех пассажей). После третьего пассажа изучали физиолого-культуральные свойства штаммов и сохранность их технологических свойств: форму и размер клеток трехсуточной культуры; наличие кольца, появление пленки, структуру осадка, спорообразование; основные технологические свойства — бродильную активность; холодоустойчивость (10°C) и термоустойчивость (37°C), кислотоустойчивость (рН 2,6), устойчивость к диоксиду серы (200 мг/дм^3 общего), спиртоустойчивость (14 об%) [30].

При проведении исследований оценивали морфолого-культуральные и технологические свойства штаммов дрожжей, хранящихся в коллекции.

2.2. Физиолого-культуральные свойства штаммов

Форму и размер клеток трехсуточной культуры, наличие кольца, появление пленки, структуру осадка изучали при сбраживании дрожжами виноградного сусла; спорообразование — при посеве на среду Горюховой (г/л, пептон — 10, хлористый натрий — 5, глюкоза — 2,5, агар-агар — 20; «Диаэм», Россия). Оценку кислото- и спиртовывносности, холодо- и термостойкости, сульфитостойкости определяли по ростовой реакции клеток дрожжей при различных условиях среды. Средой культивирования была выбрана синтетическая питательная среда YPD (пептон — 2 %, дрожжевой экстракт — 1 %, глюкоза — 2 %, рН 3,4). При оценке холодостойкости посевы инкубировали при температуре ($10 \pm 1^\circ\text{C}$), термостойкости ($37 \pm 1^\circ\text{C}$); при оценке кислотоустойчивости — при температуре ($26 \pm 1^\circ\text{C}$), рН среды корректировали до 2,6. При оценке сульфитостойкости инкубацию проводили при температуре ($26 \pm 1^\circ\text{C}$) и массовой концентрации общего диоксида серы в среде 200 мг/дм^3 . Для более четкого выявления реакции дрожжей на стрессовые факторы культивирования использовали микрозасев из расчета 30 тыс. кл./см³. Осмотр пробирок проводили ежедневно в течение 5 суток. Ростовую реакцию дрожжей на заданные условия культивирования оценивали визуально и отмечали, на какие сутки происходит забраживание сусла.

Способность штаммов образовывать сероводород исследовали на плотной питательной среде BIGGY Agar («Диаэм», Россия). Посевы культивировали при температуре ($30 \pm 0,5^\circ\text{C}$) в течение 24 часов. Наличие сероводорода оценивали визуально по шкале цвета: белый — сероводород не образуется; светло-коричневый — образуется сероводород в незначительных количествах; темно-коричневый — образуется сероводород в среднем количестве; черный — высокое образование сероводорода [30].

Форму и размер клеток оценивали при микроскопировании культуры в экспоненциальной фазе ее роста. Размеры клеток определяли и анализировали с помощью микроскопа «Микмед-5» (АО «ЛОМО»,

Россия) с системой визуализации и программным обеспечением Image Scope M. Наличие поверхностного роста и структуру осадка определяли визуально в 30-суточной культуре. Визуально оценивали характер образуемых осадков, наличие кольца и пленки на поверхности среды культивирования [30].

Экспресс-оценку избирательной способности дрожжевых культур усваивать гексозы (глюкозу и фруктозу) проводили методом культивирования дрожжей на плотных питательных средах с использованием репликатора [31]. Способность к образованию полигалактуроназы оценивали качественным методом: штаммы дрожжей рассевали на чашки Петри с агаризованной средой YBN (г/л, глюкоза — 5, полигалактуроновая кислота — 5; «Диаэм», Россия). Инкубирование проводили в термостате TC-1/80 (ОАО «Смоленское СКТБ СПУ», Россия) при $t = (30 \pm 0,5)^\circ\text{C}$. Двухсуточные колонии обрабатывали 6М-раствором соляной кислоты. Наличие зон просветления вокруг колоний свидетельствует о наличии эндополигалактуроназной активности у исследуемых штаммов [32].

Активность брожения штаммов в лабораторных условиях оценивали по количеству выделившегося диоксида углерода при сбраживании виноградного сусла (40 см^3) в специальных колбах с бродильными затворами (склянки Фреденрейха). В пастеризованное сусло вносили разводку дрожжей в количестве 2 % об. Засев производили трехсуточной культурой в активном состоянии. Склянки выдерживали в термостате TC-1/80 (ОАО «Смоленское СКТБ СПУ», Россия) при температуре ($26 \pm 1^\circ\text{C}$). Ежедневно в течение 30 суток производили взвешивание склянок на лабораторных весах HR-150A (A&D Company Ltd, Япония) с погрешностью измерения $\pm 0,2 \text{ мг}$, определяя количество CO_2 , выделенного при брожении виноградного сусла. По результатам трех повторностей находили среднее значение показателя и пересчитывали на объем сусла 100 см^3 . После окончания брожения образцы снимали с осадка и оценивали по физико-химическим показателям.

2.3. Энологические показатели

При проведении исследований использовались стандартизованные и общепринятые в виноделии методы анализа [33]. Определение физико-химических показателей сусла осуществляли следующими методами: массовую концентрацию сахаров — методом ареометрии с помощью ареометра DIN12791/L50 pression (Schneider, Германия), водородный показатель (рН) и массовую концентрацию титруемых кислот — потенциометрическим методом иономером универсальным И-160 (ТД «Автоматика», Беларусь).

В игристых виноделиях, а также после вторичного брожения определяли следующие показатели: массовую концентрацию сахаров — методом МОВВ; массовую концентрацию титруемых кислот, альдегидов и водородный показатель (рН) — потенциометрическим методом (иономер универсальный И-160, ТД «Автоматика», Беларусь), объемную долю этилового спирта — оттоном.

Терпеновые спирты обуславливают сортовой аромат винограда и вина. Содержание терпеновых спиртов в сусле и вине определяли колориметрическим методом Specord 40 (Analytik Jena, Германия) после дистилляции свободных терпеновых спиртов в условиях нейтральной среды, связанных — в условиях кислой среды.

Аминный азот является источником питания дрожжей, и содержание его в процессе брожения снижается. Содержание аминного азота в вине определяют методом формального титрования [33].

Фенольные вещества в вине ответственные за формирование органолептического профиля (аромата, вкуса и цвета), а также определяют склонность к окислению и стабильности. Массовую концентрацию общих и мономерных форм фенольных веществ определяли колориметрическим методом на спектрофотометре Specord 40 (Analytik Jena, Германия).

Высоту осадка дрожжей в горлышке бутылки перед дегоржажем оценивали визуально с помощью мерной линейки.

Пенистые свойства (максимальный объем и время разрушения пены) определяли с помощью разработанного Всероссийским национальным научно-исследовательским институтом виноградарства и виноделия «Магарах» метода (обеспечивающего такую же точность, как и при использовании прибора Mosalux [34]). Метод включает внесение в мерный цилиндр (емкостью 1 дм^3) 200 см^3 дегазированной пробы вина. С помощью портативного компрессора и распылителя, опущенного на дно мерного цилиндра, пробу вина барботировали воздухом. Объем образующейся пены устанавливали визуально по градуировке цилиндра, а время разрушения пены — с помощью секундомера.

Общее содержание диоксида углерода в игристых винах измеряли волнометрическим методом. Согласно нему, выделившийся из вина под действием ультразвука CO_2 вытеснял затворную жидкость

из градуированной емкости. Ее объем соответствовал объему диоксида углерода, содержавшегося в бутылке с игристым вином. Массовую долю связанных форм CO_2 определяли по разности между содержанием CO_2 и его растворимостью при измеренном давлении и концентрации этанола [35].

Измерение скорости десорбции диоксида углерода из пробы игристого вина (50 см^3), налитой в дегустационный бокал (ГОСТ 32051-2013¹) сразу после сброса давления до атмосферного, проводили при комнатной температуре. Для этого бокал с напитком взвешивали на лабораторных весах HR-150A (A&D Company Ltd., Япония) через равные промежутки времени с интервалом 1 мин в течение 60 мин. Скорость десорбции CO_2 (v , мг/мин) рассчитывали путем деления массы выделившегося за 60 мин из пробы вина CO_2 на время измерения.

Коэффициент игристых свойств вина характеризует время, которое потребуется, чтобы весь диоксид углерода, содержащийся в пробе, при установленной скорости десорбции выделился из напитка [36]. Показатель рассчитывали путем деления общего содержания CO_2 в пробе вина на скорость его десорбции.

Органолептическая оценка игристых вин проводилась дегустационной комиссией согласно ГОСТ 32051-2013¹ по 10-балльной системе (минимально допустимая оценка — 8,80 баллов).

Измерение значений оптической плотности D_{420} и D_{520} исследуемых вин выполняли на спектрофотометре Specord 40 (Analytik Jena, Германия) в кювете с толщиной оптического слоя 1 мм. Значения оптических характеристик вин — интенсивность цвета (И), оттенка (Т) и желтизны (G) — определяли расчетным методом [37]. Определение физико-химических показателей проводили в трех повторностях.

2.4. Технологическая схема приготовления молодых игристых вин

В сезон 2024 года из винограда сорта Мускат белый (с. Поворотное, Нахимовский район, Севастопольская виноградо-винодельческая зона) были выработаны молодые игристые вина с применением штаммов дрожжей Ленинградская (I-307) и Севастопольская 23 (I-525) разных способов хранения в коллекции. Виноград собирали при следующих условиях: массовая концентрация сахаров — 198 г/дм^3 ; титруемые кислот — $7,5 \text{ г/дм}^3$, pH — 3,4. Содержание терпеновых спиртов в сусле составило: свободных — $1,24 \text{ мг/дм}^3$, связанных — $0,62 \text{ мг/дм}^3$.

При переработке винограда получали сусло по следующей схеме: дробление винограда на валковой дробилке с гребнеотделением (ручная, «Лоза», Россия) → отделение сусла-самотека на стекателе и прессование (общий выход сусла не более 65 %) → осветление сусла отстаиванием при температуре $12-14^\circ\text{C}$ в течение $14-16 \text{ ч}$ → снятие с осадка, обработка холодом, фильтрация. Дальнейшая технологическая схема предусматривала брожение осветленного сусла при температуре $15-18^\circ\text{C}$ → снятие с дрожжевого осадка при концентрации сахаров $22-24 \text{ г/дм}^3$ → приготовление тиражной смеси с использованием имеющихся в виноматериале живых дрожжевых клеток первичного брожения (не менее $1 \text{ млн клеток/см}^3$) и бентонита ($0,2 \text{ г/дм}^3$) → розлив тиражной смеси в шампанскую бутылку из темного стекла объемом $0,75 \text{ дм}^3$, укупорка, укладка в штабели → вторичное брожение при температуре $12-14^\circ\text{C}$ в течение 45 дней → ремюаж (замораживание осадка в горлышке бутылки), дегоржаж, доливка этим же вином, укупорка → контрольная выдержка. Использование бутылок из темного стекла способствует сохранению качества игристых вин [38].

Полученные данные обрабатывались методами математической статистики в программе Statistica 10.0 (StatSoft Inc., США). Исследования выполняли в трех повторностях ($n = 3$). Результаты представ-

лены как среднее арифметическое значение с соответствующим стандартным отклонением. Различия между средними значениями переменных оценивали с помощью однофакторного дисперсионного анализа с дополнительным тестом Тьюки. Взаимосвязь между изученными переменными оценивали с помощью парной линейной корреляции Пирсона с дополнительным тестом Стьюдента. Вычисление парных корреляций между показателями осуществляли для уровня значимости $\alpha = 0,05$ для всех статистических расчетов.

3. Результаты и обсуждение

Основным критерием обоснования способа хранения микроорганизмов является сохранение жизнеспособности культуры в течение длительного периода времени, обеспечение быстрого восстановления активности клеток без изменения ее генетических и морфологических характеристик [7,9].

Согласно литературным данным, процесс адаптации клеток дрожжей в условиях температурного стресса может сопровождаться изменением их формы [39]. Изучение морфолого-культуральных признаков исследуемых штаммов дрожжей показало, что дрожжи I-525 характеризуются округлой формой, а I-307 — яйцевидной, независимо от способа хранения. Штаммы сохранили форму и размеры клеток, характер осадка, способность к образованию кольца или пленки и к спорообразованию. По морфолого-культуральным признакам значительных различий среди штаммов, хранящихся методом субкультивирования и глубокой заморозки, выявлено не было. Полученные данные представлены в Таблице 2.

Оценка технологических свойств исследуемых штаммов дрожжей предполагала изучение их способности к образованию сероводорода, полигалактуроназы; интенсивности утилизации глюкозы и фруктозы (Таблица 3). Анализ данных показал, что, независимо от способа хранения культуры, штаммы сохранили свой фенотип — чувствительный. Штамм дрожжей Севастопольская 23 характеризовался слабым продуцированием сероводорода. При этом дрожжи штамма Ленинградская H_2S не синтезировали. Показатель глюкозофильности определяли по отношению скорости роста культуры на среде с глюкозой и фруктозой соответственно. Исследуемые штаммы вне зависимости от условий хранения отличались глюкозофильностью, т. е. более активным потреблением глюкозы в качестве источника питания по сравнению с фруктозой. Таким образом, способ хранения культуры не оказал существенного влияния на основные морфолого-культуральные и технологические свойства дрожжей. Полученные результаты согласуются с данными Park и соавторов, о том, что хранение культуры дрожжей при низких температурах (минус $81 \pm 1^\circ\text{C}$) с применением глицерина в качестве криопротектора обеспечивает надежную защиту жизнеспособности дрожжевых клеток в процессе продолжительного хранения [40]. В то же время форма клеток дрожжей и способность к синтезу сероводорода были обусловлены штаммовыми особенностями.

Важной характеристикой дрожжей вида *S. cerevisiae* является их полигалактуроназная активность — способность продуцировать пектолитический фермент, расщепляющий растительные полисахариды — пектины. Это способствует снижению вязкости сусла и улучшает фильтрацию виноматериалов. В исследуемых штаммах наличия полигалактуроназной активности не выявлено.

Оценку бродильной активности дрожжей осуществляли в лабораторных условиях при температуре ($26 \pm 1^\circ\text{C}$) по количеству выделившегося диоксида углерода при сбраживании виноградного сусла

Таблица 2. Морфолого-культуральные свойства штаммов дрожжей

Table 2. Morphological and cultural properties of yeast strains

Вариант опыта	Форма клеток	Средний размер клеток, мкм	Осадок	Наличие пленки, кольца	Спорообразование
I-525 «С»	округлые	($5,2 \pm 0,6$)	конгломератный	кольцо слабое, пленку не образует	1–4 округлые споры в аске
I-525 «Т»	округлые	($5,2 \pm 0,6$)	конгломератный	кольцо слабое, пленку не образует	1–4 округлые споры в аске
I-307 «С»	яйцевидные	($5,7 \pm 0,6$)	конгломератный	кольцо слабое, пленку не образует	1–4 округлые споры в аске
I-307 «Т»	яйцевидные	($5,7 \pm 0,6$)	конгломератный	кольцо слабое, пленку не образует	1–4 округлые споры в аске

Таблица 3. Технологические свойства исследуемых штаммов дрожжей

Table 3. Technological properties of the studied yeast strains

Вариант опыта	Фенотип	Синтез H_2S	Предпочитаемый моносахарид	Полигалактуроназная активность
I-525 «С»	S	слабый	глюкоза	отсутствует
I-525 «Т»	S	слабый	глюкоза	отсутствует
I-307 «С»	S	нет	глюкоза	отсутствует
I-307 «Т»	S	нет	глюкоза	отсутствует

Примечание: S — чувствительный.

в специальных колбах. Анализ данных показал, что все штаммы сохранили способность к активному брожению. При этом процесс брожения на штамме I-525 проходил плавно, а на штамме I-307 — ступенчато (Рисунок 1). Продолжительность процесса спиртового брожения, независимо от варианта опыта, существенно не различалась и составила 20 суток. Таким образом, способы хранения микроорганизмов методом субкультивирования и криоконсервации обеспечивают сохранение высокой жизнеспособности и бро-дильной активности культур, что подтверждают литературные дан-ные [41].

Дрожжи штамма Ленинградская и Севастопольская 23, незави-симо от условий хранения культуры, обеспечили высокое продуци-рование CO_2 — от 9,9 до 10,18 г/100 см³. Математическая обработ-ка данных показала, что значения массы выделившегося диоксида углерода в процессе брожения, независимо от варианта опыта, зна-чительно не различались.

Оценка способности дрожжей адаптироваться к изменениям отдельных абиотических факторов (кислотоустойчивость, холодо- и термостойкость, сульфитостойкость) позволила проанализиро-вать их толерантность к критическим значениям pH, температуры и диоксида серы (Таблица 4). Выводы о влиянии фактора делали на основании наличия ростовой реакции клеток дрожжей (появления признаков активного брожения) при различных условиях среды. Пе-риод наблюдения составлял 5 суток. Ростовую реакцию дрожжей на заданные условия культивирования оценивали визуально и отмеча-ли, на какие сутки происходит забраживание сула. Сравнительный анализ влияния различных условий культивирования на адаптацию к стрессовым условиям показал, что исследуемые штаммы дрожжей не проявили чувствительности к высоким температурам брожения, к объемной доле этилового спирта, к концентрации диоксида серы, а также к низкому значению pH — ростовая реакция дрожжей отме-

чена на 2–3 сутки. Наиболее длительное забраживание сула при применении исследуемых штаммов дрожжей отмечено при низких температурах. Установлена более высокая устойчивость к этилово-му спирту штаммов, хранившихся методом глубокой заморозки, по сравнению с субкультивированием. В то же время дрожжи штамма I-525 отличались большей термостойкостью (независимо от способа хранения), чем I-307.

Таблица 4. Устойчивость штаммов к стрессовым условиям
Table 4. Resistance of the strains to stressful conditions

Вариант опыта	Забраживание на среде YPD при стрессовых условиях, сутки				
	темпе- ратура (37 ± 1 °C)	темпе- ратура (10 ± 1 °C)	pH 2,6	объемная доля спирта, 14 %	массовая концентрация диоксида серы, 200 мг/дм ³
I-525 «С»	2	4	3	3	3
I-525 «Т»	2	4	2	2	3
I-307 «С»	3	4	2	3	3
I-307 «Т»	3	4	2	2	3

В процессе вторичного брожения отмечено, что применение штамма дрожжей I-307, независимо от условий его хранения, обеспе-чивает более продолжительное выбраживание сахаров (на 5–21 день) по сравнению со штаммом I-525. Особенностью молодых игристых вин, приготовленных с применением штамма I-307, являлось боль-шее (на 20–30 %) количество дрожжевого осадка (высота осадка), сведенного в ходе ремюажа в горлышко бутылки перед дегоржажем, чем при использовании штамма I-525 (Таблица 5).

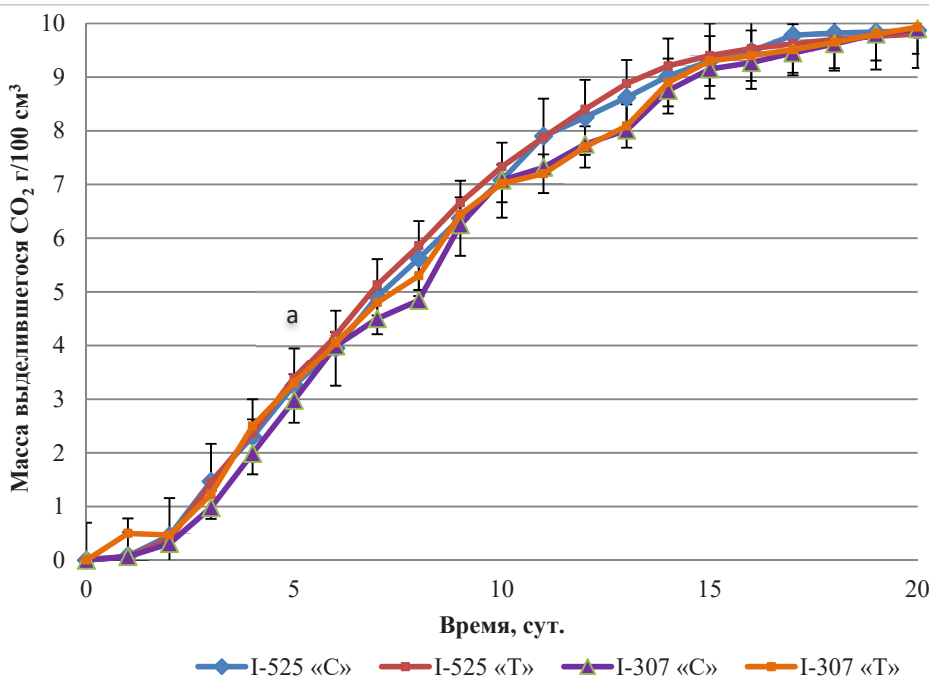


Рисунок 1. Бро-дильная активность дрожжей
Figure 1. Fermentation activity of the yeasts

Примечание: Разные и одинаковые буквы указывают на значительные ($p < 0,05$) и незначительные ($p \geq 0,05$) расхождение между данными соответственно.

Таблица 5. Физико-химические свойства игристых вин
Table 5. Physicochemical properties of sparkling wines

Вариант опыта	h осадка, см	Объемная доля этилового спирта, %	Массовая концентрация						pH
			г/дм ³		мг/дм ³				
			сахаров	ТК	ФВ	МФ	АА	А	
I-525 «С»	6,0±0,2 ^c	13,0±0,2 ^a	3,44±0,03 ^a	5,0±0,1 ^a	175±18 ^a	155±12 ^a	189±12 ^a	32,6±2,4 ^a	3,1 ^a
I-525 «Т»	5,0±0,1 ^b	13,0±0,1 ^a	3,75±0,04 ^b	5,0±0,2 ^a	194±22 ^b	168±9 ^b	224±14 ^b	43,1±3,1 ^b	3,1 ^a
I-307 «С»	4,5±0,2 ^a	12,0±0,3 ^b	3,50±0,02 ^a	5,2±0,1 ^a	189±11 ^b	149±8 ^a	266±9 ^c	29,9±1,8 ^a	3,1 ^a
I-307 «Т»	4,0±0,2 ^a	12,0±0,2 ^b	3,86±0,03 ^c	5,0±0,2 ^a	176±7 ^a	150±4 ^a	175±11 ^a	38,7±1,9 ^b	3,2 ^a

Примечание: h осадка — высота осадка дрожжей в горлышке бутылки перед дегоржажем; ТК — титруемые кислоты; ФВ — сумма фенольных веществ; МФ — мономерная фракция фенольных веществ; АА — аминный азот, А — альдегиды. Результаты представлены в виде средних значений ± стандартное отклонение ($n = 3$). Разные буквы (a, b, c, d) в одном столбце указывают на значительное расхождение между данными ($p < 0,05$).

По основным физико-химическим показателям все игристые вина соответствовали требованиям нормативной документации (ГОСТ 33336–2015¹). Объемная доля этилового спирта составляла 12,0–13,0%, причем в образцах, выработанных с использованием штамма I-525, значение показателя было на 1% об. (или 8%) выше, по сравнению с винами, полученными с использованием штамма I-307. Массовая концентрация остаточных сахаров варьировала от 3,44 до 3,86 г/дм³. По величине данного показателя полученные образцы игристых вин относятся к категории «экстра брют». Критерии кислотного комплекса вин (массовая концентрация титруемых кислот и величина pH), независимо от варианта опыта, существенно не различались и составляли 5,0–5,2 г/дм³ и 3,1–3,2 соответственно. Содержание летучих кислот находилось в диапазоне 0,21–0,73 г/дм³. Массовая концентрация аминного азота в образцах молодых игристых вин составила 175–266 мг/дм³.

Массовая концентрация альдегидов варьировала в диапазоне 29,9–44,0 мг/дм³, что характерно для белых игристых вин высокого качества [42]. Следует отметить, что в образцах, полученных с использованием штаммов, хранившихся в условиях глубокой заморозки, значение показателя было в 1,3 раза выше, чем при методе хранения в условиях субкультивирования.

Оценка фенольного комплекса молодых игристых вин показала, что общее содержание фенольных веществ в исследуемых образцах варьировало в диапазоне 175–194 мг/дм³, что позволило получить легкие, гармоничные игристые вина. Массовая доля полимерных форм фенольных веществ составляла от 11 до 21% от их общего содержания. Увеличение показателя сопряжено с повышением интенсивности окраски (И) и показателя желтизны (G) (Таблица 6). В от-

ношении показателя оттенка (Т) отмечена обратная зависимость. Показатель оптической плотности D_{420} исследуемых образцов характеризовался низкими значениями [43], что типично для молодых вин с соломенным цветом. В то же время можно отметить более значимое влияние штамма дрожжей на величину оптических показателей игристых вин, по сравнению со способом хранения культуры.

Анализ типичных свойств игристых вин показал (Таблица 7), что образцы, полученные с использованием штамма дрожжей I-307, отличались более высоким давлением CO_2 (на 9–21%) и содержанием связанных форм CO_2 (на 18,5–20,3%), а также значением коэффициента игристых свойств ($K > 100$) и лучшей устойчивостью пены (более 60 с) [44]. В данном случае высокие коэффициенты игристых свойств опытных кюве можно объяснить более медленным протеканием процесса брожения на штамме I-307, что способствовало большему накоплению связанных форм диоксида углерода. В свою очередь, массовая доля связанных форм CO_2 коррелировала с коэффициентом игристых свойств ($r = 0,9$).

В ходе анализа динамики десорбции диоксида углерода (Рисунок 2) было установлено, что наиболее интенсивной «игрой» (скоростью десорбции CO_2) характеризовался образец, полученный с использованием штамма I-525 (хранение субкультивированием).

Наиболее медленное выделение пузырьков CO_2 происходило в опытном образце игристого вина, полученного с использованием штамма I-307 (хранение субкультивированием). Такая скорость десорбции способствует длительной «игре» в бокале и характеризует высокие игристые свойства вина.

Анализ ароматобразующего комплекса игристых вин не позволил выявить влияния способа хранения культуры дрожжей на массовую концентрацию терпеновых спиртов. Установлено, что наибольшая концентрация свободных форм терпеновых спиртов (которые

¹ ГОСТ 33336–2015 «Вина игристые. Общие технические условия». М.: Стандартинформ, 2016. — 12 с.

Таблица 6. Оптические характеристики игристых вин

Table 6. Optical characteristics of sparkling wines

Вариант опыта	G	D_{420}	D_{520}	И	Т
I-525 «С»	7,75 ± 0,04 ^a	0,071 ± 0,04 ^a	0,017 ± 0,02 ^a	0,088 ± 0,05 ^a	4,176 ± 0,37 ^b
I-525 «Т»	8,06 ± 0,06 ^b	0,074 ± 0,03 ^a	0,015 ± 0,02 ^a	0,089 ± 0,06 ^a	4,933 ± 0,028 ^c
I-307 «С»	10,52 ± 0,11 ^d	0,097 ± 0,07 ^b	0,026 ± 0,03 ^b	0,123 ± 0,09 ^b	3,731 ± 0,021 ^a
I-307 «Т»	10,03 ± 0,07 ^c	0,094 ± 0,04 ^b	0,025 ± 0,03 ^b	0,119 ± 0,07 ^b	3,760 ± 0,018 ^a

Примечание: G — показатель желтизны; D_{420} , D_{520} — оптическая плотность при соответствующих длинах волн; И — интенсивность окраски; Т — оттенок окраски. Разные буквы (a, b, c, d) в одном столбце указывают на значительное расхождение между данными ($p < 0,05$).

Таблица 7. Типичные свойства игристых вин

Table 7. Typical properties of sparkling wines

Вариант опыта	P_{CO_2} , кПа	v , мг/мин	K, мин	ωCO_2	V_{max} , см ³	t, с
I-525 «С»	700 ± 12 ^b	6,267 ± 0,012 ^c	77,9 ± 2,3 ^a	0,148 ± 0,004 ^a	660 ± 15 ^c	35 ± 3 ^b
I-525 «Т»	630 ± 10 ^a	5,367 ± 0,09 ^b	104,9 ± 4,1 ^b	0,172 ± 0,008 ^b	510 ± 12 ^a	26 ± 2 ^a
I-307 «С»	760 ± 15 ^c	3,583 ± 0,02 ^a	108,0 ± 5,4 ^b	0,203 ± 0,010 ^c	580 ± 9 ^b	> 60 ^c
I-307 «Т»	750 ± 11 ^c	5,533 ± 0,011 ^b	101,1 ± 4,7 ^b	0,185 ± 0,009 ^b	570 ± 11 ^b	> 60 ^c
Рекомендуемые значения	> 300		> 100		> 400	20–60

Примечание: P_{CO_2} — равновесное давление CO_2 в бутылке; v — скорость десорбции CO_2 ; K — коэффициент игристых свойств; ωCO_2 — массовая доля связанных форм диоксида углерода в вине; V_{max} — максимальный объем пены; t — время разрушения пены. Разные буквы (a, b, c, d) в одном столбце указывают на значительное расхождение между данными ($p < 0,05$).

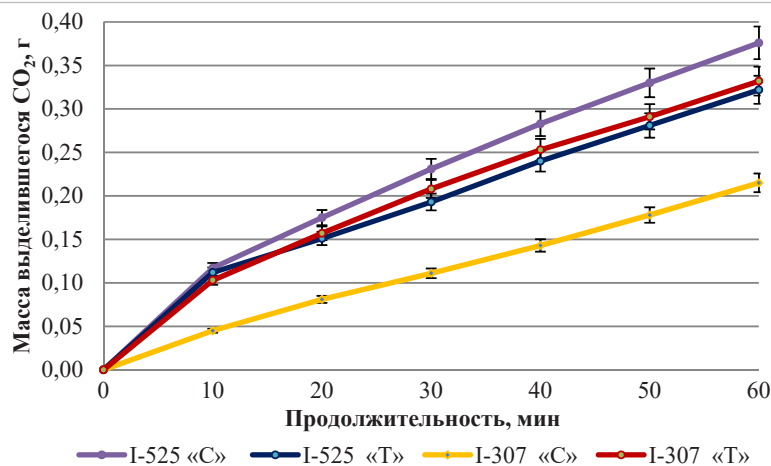


Рисунок 2. Динамика десорбции диоксида углерода в образцах игристых вин

Figure 2. Dynamics of carbon dioxide desorption in sparkling wine samples

Примечание: планки разброса показывают границы доверительных интервалов для доверительной вероятности $P = 0,95$.

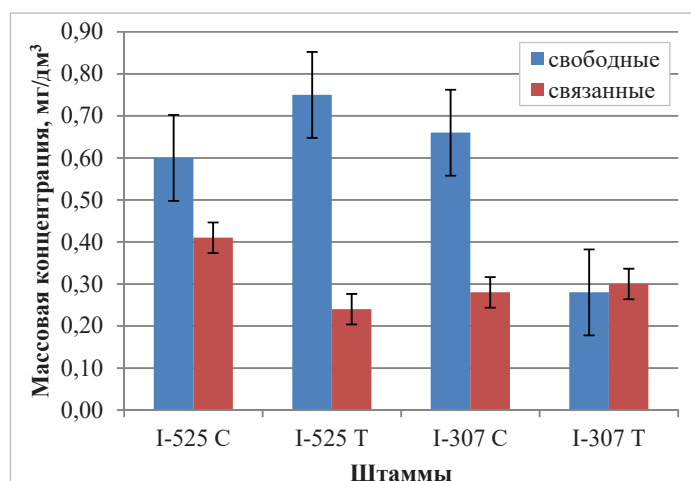


Рисунок 3. Содержание терпеновых соединений в игристых винах

Figure 3. The content of terpene compounds in sparkling wines

Примечание: различия между вариантами опыта существенны ($p < 0,05$).

и придают винам характерный мускатный аромат) была определена в образцах, полученных с использованием штаммов I-525 «Т», I-525 «С», I-307 «С».

В то же время достаточно высокое содержание связанных форм терпеновых спиртов в образцах, выработанных с использованием штамма I-525 «С», может способствовать дальнейшему раскрытию аромата при хранении вина. Следует отметить, что в процессе брожения произошло снижение содержания свободных и связанных форм терпеновых спиртов в 2,0–4,4 и 1,2–2,1 раза соответственно по сравнению с исходным суслом.

В ходе органолептического анализа молодых игристых вин (Таблица 8) было установлено, что образцы, приготовленные с использованием штамма I-525, характеризовались более выраженным сортовым ароматом и гармоничным вкусом. Наиболее гармоничным органолептическим профилем характеризовался образец, полученный с применением штамма I-525 (хранение методом заморозки), и был оценен в 9,3 балла. Его ароматический профиль отличался вы-

раженной цитронной нотой в аромате и вкусе, что может быть обусловлено высоким содержанием свободных форм терпеновых спиртов.

Образцы игристых вин, приготовленные с использованием штамма I-307, несколько уступали по качеству образцам с использованием штамма I-525. Необходимо отметить, что продолжительное первичное брожение сусла с применением штаммов дрожжей I-307, отстающее на 21 день от I-525, обусловило появление тонов сероводорода в аромате вин и ухудшение их качества.

4. Выводы

В результате проведенных исследований по изучению влияния условий хранения культур дрожжей на их морфолого-культуральные признаки значительных различий не выявлено. Штаммы сохранили форму и размеры клеток, характер осадка, способность к образованию кольца или пленки, фенотип штамма и способность к спорообразованию. Значительных различий в процессе брожения сусла при температуре $26 \pm 1^\circ\text{C}$ исследуемых штаммов, хранившихся двумя способами, выявлено не было. Все они сохранили способность к активному брожению. При этом процесс брожения при температуре $26 \pm 1^\circ\text{C}$ на штамме I-525 проходил плавно, а на штамме I-307 — ступенчато. Значительных различий в устойчивости к стрессовым условиям у штаммов, хранящихся субкультивированием или методом глубокой заморозки, также выявлено не было.

Процесс вторичного брожения при температуре $15\text{--}18^\circ\text{C}$ на штамме I-525 проходил значительно быстрее (на 5–21 день), чем на I-307, что обусловило более гармоничный органолептический профиль соответствующих молодых игристых вин. В то же время продолжительный процесс дображивания в бутылке способствовал накоплению связанных форм CO_2 и улучшению пенистых и игристых свойств вина. Образцы игристых вин, полученные с использованием штамма дрожжей I-307, отличались более высоким давлением CO_2 (на 9–21%) и содержанием связанных форм CO_2 (на 18,5–20,3%), а также значением коэффициента игристых свойств ($K > 100$) и лучшей устойчивостью пены (более 60 с).

Таким образом, метод хранения культуры дрожжей в условиях глубокой заморозки обеспечивает сохранение основных морфолого-культуральных и технологических свойств дрожжей, аналогично методу субкультивирования. В то же время он является менее трудоемким, что обуславливает целесообразность его применения для продолжительного хранения микроорганизмов. Исследования в данном направлении планируется продолжить.

Таблица 8. Органолептическая характеристика игристых вин

Table 8. Organoleptic characteristics of sparkling wines

Вариант опыта	Органолептическая характеристика	ДО*, балл
I-525 «С»	Аромат — яркий, с цитронной нотой и леденцовыми оттенками. Вкус — полный, свежий, гармоничный, с пикантной горчинкой. Типичность — игра средняя, пенообразование среднedisперсное, венчик долгое время присутствует, игра интенсивная.	9,2
I-525 «Т»	Аромат — тонкий, сортовой, хорошо выражена цитронная нота. Вкус — полный, свежий, гармоничный, в послевкусии горчинка цедры. Типичность — игра средняя, пенообразование среднedisперсное, венчик долгое время присутствует, игра интенсивная, хорошая углекислотная насыщенность.	9,3
I-307 «С»	Аромат — умеренный, травянисто-цветочный. Вкус — умеренно свежий, облегченный. Типичность — пенообразование хорошее и долгое, интенсивная игра, мелкие четки.	9,0
I-307 «Т»	Аромат — умеренный, травянистого направления с цветочными и цитронными оттенками. Вкус — умеренно свежий, полный. Типичность — пенообразование хорошее и долгое, интенсивная игра, мелкие четки.	9,1

Примечание: ДО* — дегустационная оценка.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / REFERENCES

- Benito, S. (2020). Modern technologies and their influence in fermentation quality. *Fermentation*, 6(1), Article 13. <https://doi.org/10.3390/fermentation6010013>
- Yu, X., Xu, J., Li, Y. P., Li, X. P. (2021). Isolation and screening of wine yeasts from grapes in yalu river valley china for fermentation performance. *American Journal of Biochemistry and Biotechnology*, 17(3), 338–345. <https://doi.org/10.3844/ajbbsp.2021.338.345>
- Çelik, Z. D., Erten, H., Cabaroğlu, T. (2019). The influence of selected autochthonous *saccharomyces cerevisiae* strains on the physicochemical and sensory properties of narinces wines. *Fermentation*, 5(3), Article 70. <https://doi.org/10.3390/fermentation5030070>
- Crespo, J., García, M., Arroyo, T., Romero, V., Cabellos, J. M. (2023). Influence of native *Saccharomyces cerevisiae* strains on Malvasia aromatica wines. *Frontiers in Bioscience-Elite*, 15(3), Article 18. <https://doi.org/10.31083/fbe1503018>
- Tsiakis, T., Anagnostou, E., Granata, G., Manakou, V. (2022). Communicating terroir through wine label toponymy Greek wineries practice. *Sustainability*, 14(23), Article 16067. <https://doi.org/10.3390/su142316067>
- Иванова, Е. В. (14–15 апреля, 2020). Поддержание и пополнение генофонда коллекций микроорганизмов виноделия "Магарач". Современная микология в России. Материалы 4 Микологического форума, Москва: Националь-
- ная академия микологии Общероссийская Общественная Организация, 2020. [Ivanova E. V. (April 14–15, 2020). Maintenance and supplementation of the gene pool of the collection of microorganisms of winemaking "Magarach". Modern mycology in Russia. Proceedings of the 4th Mycological Forum, Moscow: All-Russian Public Organization "National Academy of Mycology", 2020. (In Russian)]
- Ravimannan, N. (2016). Investigating alternative yeast storage methods. *International Journal of Advanced Research in Biological Sciences*, 3(11), 109–111. <http://doi.org/10.22192/ijarbs.2016.03.11.012>
- Moretti, M., Tartaglia, J., Accotto, G. P., Beato, M. S., Bernini, V., Bevivino, A. et al. (2024). Treasures of italian microbial culture collections: An overview of preserved biological resources, offered services and know-how, and management. *Sustainability*, 16(9), Article 3777. <https://doi.org/10.3390/su16093777>
- Boundy-Mills, K. (2012). Yeast culture collections of the world: Meeting the needs of industrial researchers. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, 39(5), 673–680. <https://doi.org/10.1007/s10295-011-1078-5>
- López, M. D. G., López-Coronado, J. M., López-Ocaña, L., Fernández, F. U. (2011). Preservation of Microbial Strains in the Wine Industry. Chapter in a book: *Molecular Wine Microbiology*. Elsevier EBooks, 2011. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-375021-1.10012-8>

11. Mariano, P. D. L. S., Gonçalves, R. B., Höfling, J. F. (2007). Storage procedures for yeast preservation: Phenotypic and genotypic evaluation. *Annals of Microbiology*, 57(3), 461–465. <https://doi.org/10.1007/BF03175090>
12. Иванова, Е. В., Луткова, Н. Ю. (2024). Сохранность штаммов дрожжей виноделия при разных способах хранения в коллекции. «Магарач». Виноградарство и виноделие, 26(1), 93–98. [Ivanova, E. V., Lutkova, N. Yu. (2024). Preservation of winemaking yeast strains under different storage methods in the collection. *Magarach. Viticulture and Winemaking*, 26(1), 93–98. (In Russian)] <https://doi.org/10.34919/IM.2024.28.89.015>
13. Кривушина, А. А., Бобырева, Т. В., Яковенко, Т. В., Николаев, Е. В. (2019). Методы хранения микроорганизмов-деструкторов в коллекции ФГУП «ВИАМ» (обзор). *Авиационные материалы и технологии*, 3(56), 89–94. [Krivushina, A. A., Bobyrev, T. V., Yakovenko, T. V., Nikolaev, E. V. (2019). Methods of microorganisms-destructors storage in FSUE «VIA» collection (review). *Aviation Materials and Technologies*, 3(56), 89–94. (In Russian)] <https://doi.org/10.18577/2071-9140-2019-0-3-89-94>
14. Puchkov, E. O. (2023). Preservation of viable microorganisms in the laboratory: An overview of basics, methods and practical recommendations for beginners. *Austin Journal of Biotechnology and Bioengineering*, 10(1), Article 1119. <https://doi.org/10.26420/austinjbiotechnolbioeng.2023.1119>
15. Wolkers, W. F., Oldenhof, H. (2020). Principles underlying cryopreservation and freeze-drying of cells and tissues. Chapter in a book: *Cryopreservation and Freeze-Drying Protocols*. Humana Press, N. Y., 2020. https://doi.org/10.1007/978-1-0716-0783-1_1
16. Zhao, G., Zhang, G. (2005). Effect of protective agents, freezing temperature, rehydration media on viability of malolactic bacteria subjected to freeze-drying. *Journal of Applied Microbiology*, 99, 333–338. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.2005.02587.x>
17. Танащук, Т. Н., Иванова, Е. В., Кишковская, С. А., Шаламитский, М. Ю., Луткова, Н. Ю., Загоруйко, В. И. и др. (2024). Каталог промышленных штаммов дрожжей для виноделия. Симферополь: ИП Корниенко А. А., 2024. [Tanashchuk, T. N., Ivanova, E. V., Kishkovskaya, S. A., Shalamitskiy, M. Yu., Lutkova, N. Yu., Zagoruyko, V. I. et al. (2024). Catalog of industrial yeast strains for winemaking. Simferopol: IP Kornienko A. A., 2024. (In Russian)]
18. Sidari, R., Caridi, A. (2009). Viability of commercial wine yeasts during freezer storage in glycerol-based media. *Folia Microbiologica*, 54(3), 230–232. <https://doi.org/10.1007/s12223-009-0036-3>
19. Савкина, О. А., Терновской, Г. В., Локачук, М. Н., Павловская, Е. Н., Сафронова, В. И. (2014). Криоконсервация — перспективный метод хранения промышленно ценных штаммов молочнокислых бактерий и дрожжей. *Сельскохозяйственная биология*, 4, 112–119. [Savkina, O. A., Ternovskoi, G. V., Lokachuk, M. N., Pavlovskaya, E. N., Safronova, V. I. (2014). Cryopreservation to be a progressive method for keeping up valuable strains of lactic acid bacteria and yeasts. *Agricultural Biology*, 4, 112–119. (In Russian)] <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2014.4.112rus>
20. Выборнова, Т. В., Шарова, Н. Ю., Принцева, А. А. (2018). Исследование влияния низких температур на сохранение жизнеспособности штаммов в процессе хранения. *Техника и технология пищевых производств*, 48(3), 34–39. [Vybornova, T. V., Sharova, N. Yu., Printseva, A. A. (2018). Low-temperature storage and the viability preservation of streptomycetes. *Food Processing: Techniques and Technology*, 48(3), 34–40. (In Russian)] <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2018-3-34-40>
21. Утепешева, А. А. (2019). Подбор методов длительного хранения коллекционных штаммов микромицетов и дрожжей. *Экобиотех*, 2(4), 494–498. [Utepeshcheva, A. A. (2019). Selection of methods for long storage of collection strains of micromycetes and yeasts. *Ecobiotech*, 2(4), 494–498. (In Russian)] <https://doi.org/10.31163/2618-964X-2019-2-4-494-498>
22. Dzhakibaeva, G. T., Shemshura, O. N., Tleubekova, D. A. (2022). Evaluation of viability and biological activity of bakery and wine yeast after long-term preservation. *Microbiology and Virology*, 1(36), 44–56. <https://doi.org/10.53729/MV-AS.2022.01.03>
23. Pradelles, R., Vichi, S., Alexandre, H., Chassagne, D. (2009). Influence of the drying processes of yeasts on their volatile phenol sorption capacity in model wine. *International Journal of Food Microbiology*, 135(2), 152–157. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodmicro.2009.07.019>
24. Харчук, И. А. (2019). Обзор методов длительного хранения культур микроводорослей и цианобактерий, используемых в коллекциях Всемирной федерации культур (WFCC) в базе WDCM CCINFO. *Вопросы современной альгологии*, 3(21), 1–27. [Kharchuk, I. A. (2019) The review of methods of the long-term storage of microalgae and cyanobacteria cultures used in collections of the world federation of cultures (WFCC) in WDCM CCINFO base. *Issues of Modern Algology*, 3(21), 1–27. (In Russian)] [https://doi.org/10.33624/2311-0147-2019-3\(21\)-1-27](https://doi.org/10.33624/2311-0147-2019-3(21)-1-27)
25. Câmara, A. A., Sant'Ana, A. S. (2020). Advances in yeast preservation: Physiological aspects for cell perpetuation. *Current Opinion in Food Science*, 38, 62–70. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2020.10.019>
26. Morgan, C. A., Herman, N., White, P. A., Vesey, G. (2006). Preservation of microorganisms by drying: A review. *Journal of Microbiological Methods*, 66(2), 183–193. <https://doi.org/10.1016/j.mimet.2006.02.017>
27. Комиссаров, Н. С., Дьяков, М. Ю., Гарибова, Л. В. (2023). Методы длительного хранения чистых культур макромицетов. *Микология и фитопатология*, 57(3), 155–171. [Komissarov, N. S., Dyakov, M. Yu., Garibova, L. V. (2023). Methods for Long-Term Storage of Pure Cultures of Macrofungi. *Mycology and Phytopathology*, 57(3), 155–171. (In Russian)] <https://doi.org/10.31857/S0026364823030054>
28. Miyamoto-Shinohara, Y., Nozawa, F., Sukenobe, J., Imaizumi, T. (2010). Survival of yeasts stored after freeze-drying or liquid-drying. *The Journal of General and Applied Microbiology*, 56, 107–119. <https://doi.org/10.2323/jgam.56.107>
29. Cabrera, E., Welch, L. C., Robinson, M. R., Sturgeon, C. M., Crow, M. M., Segarra, V. A. (2020). Cryopreservation and the freeze-thaw stress response in yeast. *Genes*, 11(8), Article 835. <https://doi.org/10.3390/genes11080835>
30. Vasyagin, E. A., Urakov, V. N., Shalamitskiy, M. Yu., Chervyak, S. N., Ivanova, E. V., Zagoruyko, V. I. et al. (2025). Development of a wine yeast strain capable of malolactic fermentation and reducing the ethyl carbamate content in wine. *Foods*, 14(1), Article 54. <https://doi.org/10.3390/foods14010054>
31. Скорикова, Т. Н., Танащук, Т. Н., Шаламитский, М. Ю. (2017). Оценка способности дрожжей рода *Saccharomyces* использовать в качестве источника углеводов глюкозу и фруктозу и фруктозу. *Магарач. Виноградарство и виноделие*, 4, 44–45. [Skorikova, T. K., Tanashchuk, T. N., Shalamitskiy, M. Yu. (2017). Evaluating of *Saccharomyces* yeast ability to use glucose or fructose in the kind of carbon source. *Magarach. Viticulture and Winemaking*, 4, 44–45. (In Russian)]
32. Blanco, P., Sieiro, C., Diaz, A., Villa, T. G. (1994). Production and partial characterization of an endopolygalacturonase from *Saccharomyces cerevisiae*. *Canadian Journal of Microbiology*, 40(11), 974–977. <https://doi.org/10.1139/m94-155>
33. Гержикова, В. Г. (2009). Методы техникохимического контроля в виноделии. Симферополь: Таврида, 2009. [Gerzhikova, V. G. (2009). Methods of technical chemistry control in winemaking. Simferopol: Tavrda, 2009. (In Russian)]
34. Ubeda, C., Lambert-Royo, M. I., Gil i Cortiella, M., Del Barrio-Galán, R., Peña-Neira, A. (2021). Chemical, physical and sensory effects of the use of bentonite at different stages of the production of traditional sparkling wines. *Foods*, 10(2), Article 390. <https://doi.org/10.3390/foods10020390>
35. Мерзжанян, А. А. (1978). Физико-химия игристых вин. М.: Пищевая промышленность, 1978. [Merzhanian, A. A. (1978). Physico-chemistry of sparkling wines. Moscow: Food industry, 1978. (In Russian)]
36. Лутков, И. П. (2022). Оценка игристых свойств напитков. «Магарач». Виноградарство и виноделие, 24(1), 63–70. [Lutkov, I. P. (2022). Evaluation of sparkling properties of beverages. *Magarach. Viticulture and Winemaking*, 24(1), 63–70. (In Russian)] <https://doi.org/10.35547/IM.2022.78.26.010>
37. Аникина, Н. С., Червяк, С. Н., Гниломодова, Н. В. (2019). Методы оценки цвета вин. Обзор. *Аналитика и контроль*, 23(2), 158–167. [Anikina, N. S., Chervyak, S. N., Gnilomedova, N. V. (2019). Methods for evaluating the color of wines. The review. *Analytics and Control*, 23(2), 158–167. (In Russian)] <https://doi.org/10.15826/analitika.2019.23.2.003>
38. Дубинина, Е. В., Моисеева, А. А., Андриевская, Д. В., Трофименко, В. А. (2023). Влияние внешних факторов на стабильность качества игристого вина при хранении. *Пищевые системы*, 6(2), 130–138. [Dubinina, E. V., Moiseeva, A. A., Andrievskaya, D. V., Trofimchenko, V. A. (2023). Effect of external factors on the stability of sparkling wine quality during storage. *Food Systems*, 6(2), 130–138. (In Russian)] <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2023-6-2-130-138>
39. Исламгагомедова, Э., Халилова, Э., Котенко, С., Гасанов, Р., Абакарова, А., Аливердиева, Д. (2020). Влияние различных значений температуры на морфологические свойства дрожжей *Saccharomyces cerevisiae*. *Хранение и переработка сельскохозяйственного сырья*, 2, 59–72. [Islammagomedova, E., Khalilova, E., Kotenko, S., Gasanov, R., Abakarova, A., Aliverdieva, D. (2020). Influence of different temperature values on the morphological properties of *Saccharomyces cerevisiae* yeast. *Storage and Processing of Farm Products*, 2, 59–72. (In Russian)] <https://doi.org/10.36107/spfp.2020.322>
40. Park, J.-I., Grant, C. M., Attfield, P. V., Dawes, I. W. (1997). The freeze-thaw stress response of the yeast *Saccharomyces cerevisiae* is growth phase specific and is controlled by nutritional state via the RAS-cyclic AMP signal transduction pathway. *Applied and Environmental Microbiology*, 63(10), 3818–3824. <https://doi.org/10.1128/AEM.63.10.3818-3824.1997>
41. Джакибаева, Г. Т., Шемшюра, О. Н., Тлеубекова, Д. А. (2022). Оценка жизнеспособности и биологической активности хлебопекарных и винных дрожжей после длительного хранения. *Микробиология және вирусология*, 1(36), 44–56. [Dzhakibaeva, G. T., Shemshura, O. N., Tleubekova, D. A., (2022). Evaluation of viability and biological activity of bakery and wine yeast after long-term preservation. *Microbiology and Virology*, 1(36), 44–56. (In Russian)] <https://doi.org/10.53729/MV-AS.2022.01.03>
42. Дубинина, Е. В., Оганесянц, Л. А., Песчанская, В. А., Семипятный, В. К., Чистова, А. А. (2020). Прогнозирование качества игристого вина на основе определения дополнительных показателей физико-химического состава исходного виноматериала. *Пиво и напитки*, 1, 9–13. [Dubinina, E. V., Oganesyants, L. A., Peschanskaya, V. A., Semipyatnyi, V. K., Chistova, A. A. (2020). Prediction of sparkling wine quality based on original wine material determination of additional indicators of physicochemical composition. *Beer and Beverages*, 1, 9–13. (In Russian)]
43. Sartor, S., Burin, V., Calari, V., Bordignon-Luiz, M. (2021). Profiling of free amino acids in sparkling wines during over-les aging and evaluation of sensory properties. *LWT*, 140, Article 110847. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110847>
44. Makarov, A., Shmigelskaya, N., Lutkov, I., Maksimovskaya, V., Sivochoub, G. (September 5–9, 2022). *Improving the criteria of assessing grapes and base wines in the production of sparkling wines*. BIO Web of Conferences. International Scientific-Practical Conference “Modern Trends of Science, Innovative Technologies in Viticulture and Winemaking” (MTSITVW2022). Yalta, Republic of Crimea, Russian Federation, 2022. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20225306001>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ	AUTHOR INFORMATION
Принадлежность к организации	Affiliation
<p>Луткова Наталия Юрьевна — младший научный сотрудник, лаборатория микробиологии, Всероссийский национальный научно-исследовательский институт виноградарства и виноделия «Магарах» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» 298600, Россия, Республика Крым, Ялта, ул. Кирова, 31 E-mail: lutkova1975@mail.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8126-7596</p> <p>Иванова Елена Владимировна — кандидат технических наук, старший научный сотрудник, ведущий научный сотрудник, лаборатория микробиологии, Всероссийский национальный научно-исследовательский институт виноградарства и виноделия «Магарах» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» 298600, Россия, Республика Крым, Ялта, ул. Кирова, 31 E-mail: lenochka_ivanova_58@mail.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5989-6604</p> <p>Червяк София Николаевна — кандидат технических наук, старший научный сотрудник, лаборатория цифровых технологий в виноделии и виноградарстве, Всероссийский национальный научно-исследовательский институт виноградарства и виноделия «Магарах» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» 298600, Россия, Республика Крым, Ялта, ул. Кирова, 31 E-mail: Sofi4@list.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9551-7448 * автор для контактов</p> <p>Лутков Игорь Павлович — кандидат технических наук, старший научный сотрудник, ведущий научный сотрудник, лаборатория игристых вин, Всероссийский национальный научно-исследовательский институт виноградарства и виноделия «Магарах» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» 298600, Россия, Республика Крым, Ялта, ул. Кирова, 31 E-mail: igorlutkov@mail.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9515-4341</p>	<p>Nataliya Yu. Lutkova, Junior Staff Scientist, Laboratory of Microbiology, All-Russian National Research Institute of Viticulture and Winemaking “Magarach” of the National Research Centre “Kurchatov Institute” 31, Kirova str., 298600, Yalta, Republic of Crimea, Russia E-mail: lutkova1975@mail.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8126-7596</p> <p>Elena V. Ivanova, Candidate of Technical Science, Senior Staff Scientist, Leading Staff Scientist, Laboratory of Microbiology, All-Russian National Research Institute of Viticulture and Winemaking “Magarach” of the National Research Centre “Kurchatov Institute” 31, Kirov str., 298600, Yalta, Republic of Crimea, Russia E-mail: lenochka_ivanova_58@mail.ru; ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5989-6604</p> <p>Sofiya N. Chervyak, Candidate of Technical Sciences, Senior Staff Research, Department of Digital Technologies in Winemaking and Viticulture, All-Russian National Research Institute of Viticulture and Winemaking “Magarach” of the National Research Centre “Kurchatov Institute” 31, Kirov str., 298600, Yalta, Republic of Crimea, Russia E-mail: Sofi4@list.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9551-7448 * corresponding author</p> <p>Igor P. Lutkov, Candidate of Technical Sciences, Senior Staff Scientist, Leading Staff Scientist Laboratory of Sparkling Wines, All-Russian National Research Institute of Viticulture and Winemaking “Magarach” of the National Research Centre “Kurchatov Institute” 31, Kirov Str., 298600 Yalta, Republic of Crimea, Russia E-mail: igorlutkov@mail.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9515-4341</p>
Критерии авторства	Contribution
<p>Луткова Наталия Юрьевна — формулирование основной идеи, постановка задач, приготовление чистых культур дрожжей, проведение анализов;</p> <p>Иванова Елена Владимировна — проведение микробиологических исследований;</p> <p>Червяк София Николаевна — редактирование статьи, формулирование выводов, переписка;</p> <p>Лутков Игорь Павлович — приготовление игристых вин, проведение анализов типичных свойств игристых вин.</p>	<p>Nataliya Yu. Lutkova — the main idea, the formulation of tasks, the preparation of pure yeast cultures, the analysis;</p> <p>Elena V. Ivanova — conducting microbiological research;</p> <p>Sofiya N. Chervyak — editing of the article, formulation of conclusions, correspondence;</p> <p>Igor P. Lutkov — preparation of sparkling wines, analysis of typical properties of sparkling wines.</p>
Конфликт интересов	Conflict of interest
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.	The authors declare no conflict of interest.

DOI: <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-4-533-540>



Поступила 05.11.2025

Поступила после рецензирования 05.12.2025

Принята в печать 09.12.2025

© Раева-Богословская Е. Н., Молканова О. И., Крахмалева И. Л.,
Кузнецова О. А., Утянов Д. А., Митрофанова И. В., 2025

<https://www.fsjour.com/jour>

Обзорная статья

Открытый доступ

ХЕНОМЕЛЕС: ПЕРСПЕКТИВНЫЙ ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ПРОДУКТ ДЛЯ ПИЩЕВОЙ И ФАРМАЦЕВТИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Раева-Богословская Е. Н.^{1*}, Молканова О. И.¹, Крахмалева И. Л.¹,
Кузнецова О. А.², Утянов Д. А.^{1,2}, Митрофанова И. В.¹

¹Главный ботанический сад им. Н. В. Цицина Российской академии наук, Москва, Россия

²Федеральный научный центр пищевых систем им. В. М. Горбатова, Москва, Россия

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: АННОТАЦИЯ

Chaenomeles,
биохимический
состав, плоды,
листья, семена

В связи с ухудшением экологической обстановки для пищевой промышленности становится актуальным поиск фиторесурсов, характеризующихся радиопротекторным и антиоксидантным свойствами. Некоторые плодовые культуры являются богатыми источниками биологически активных веществ (БАВ). Особый интерес представляют растения, которые содержат БАВ не только в плодах, но и в других его частях: семенах и листьях. Представители *Chaenomeles* Lindl могут стать перспективной культурой для сельского хозяйства, пищевой и фармацевтической промышленности России. В большинстве случаев *Chaenomeles* культивируют для получения плодов, но есть и другие направления его использования. В этом обзоре рассмотрены биологические особенности, селекция и биохимический состав различных частей растений рода *Chaenomeles*. Подходящими видами для выращивания на территории РФ являются: *C. japonica*, *C. speciosa*, *C. × superba* и *C. cathayensis*. Представлена характеристика сортов *Chaenomeles* основных селекционных центров в России (Никитский ботанический сад — Национальный научный центр Российской академии наук и Мичуринский ГАУ). Проведен анализ зарубежной и отечественной научной литературы, отражающей биохимический состав плодов, листьев и семян различных видов *Chaenomeles*. Описано содержание основных антиоксидантных веществ (витамин С и полифенолы) и других соединений в плодах, листьях и семенах видов *Chaenomeles*. По литературным данным наибольшее содержание витамина С в плодах *C. speciosa* и *C. cathayensis*. Все части растения содержат хлорогеновую кислоту и полифенолы в различных концентрациях. Из исследуемых видов наиболее изучены *C. japonica*, *C. speciosa*, в то время как по *C. cathayensis* представлено наименьшее количество работ.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Работа выполнена при поддержке гранта № 25-16-00145 РНФ.

Received 05.11.2025

Accepted in revised 05.12.2025

Accepted for publication 09.12.2025

© Raeva-Bogoslovskaya E. N., Molkanova O. I., Krakhmaleva I. L.,
Kuznetsova O. A., Utyanov D. A., Mitrofanova I. V., 2025

Available online at <https://www.fsjour.com/jour>

Review article

Open access

CHAENOMELES: A PROMISING FUNCTIONAL PRODUCT FOR THE FOOD AND PHARMACEUTICAL INDUSTRIES

Ekaterina N. Raeva-Bogoslovskaya^{1*}, Olga I. Molkanova¹, Irina L. Krakhmaleva¹,
Oksana A. Kuznetsova², Dmitry A. Utyanov^{1,2}, Irina V. Mitrofanova¹

¹Main Botanical Garden named after N. V. Tsitsin of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

²V. M. Gorbato Federal Research Center for Food Systems of RAS, Moscow, Russia

KEYWORDS:

Chaenomeles,
biochemical
composition, fruits,
leaves, seeds

ABSTRACT

In light of the deteriorating environmental situation, the search for phytogetic resources with radioprotective and anti-oxidant properties has become increasingly relevant for the food industry. Certain fruit crops are rich sources of biologically active compounds (BACs). The plants of particular interest are those that accumulate these compounds not only in their fruit, but also in other parts such as seeds and leaves. Representatives of the genus *Chaenomeles* Lindl. may represent a promising crop for agriculture, the food and pharmaceutical industries in Russia. Although *Chaenomeles* is mainly cultivated for its fruit production, there are other potential applications that are worth noting. This review examines the biological characteristics, breeding, and biochemical composition of different parts of *Chaenomeles* species. The most suitable species for cultivation in the Russian Federation include *C. japonica*, *C. speciosa*, *C. × superba*, and *C. cathayensis*. The paper provides an overview of *Chaenomeles* cultivars developed by major Russian breeding centers, such as the Nikitsky Botanical Gardens — National Scientific Center (NBS-NSC) and Michurinsk State Agrarian University. Both domestic and international studies on the biochemical composition of *Chaenomeles* fruits, leaves, and seeds are analyzed. The content of major antioxidant compounds (vitamin C and polyphenols), as well as other bioactive substances, in various plant parts is described. According to literature data, the highest vitamin C concentrations are found in the fruits of *C. speciosa* and *C. cathayensis*. All parts of the plant contain chlorogenic acid and polyphenols in varying concentrations. Among the studied species, *C. japonica* and *C. speciosa* are the most thoroughly investigated, whereas *C. cathayensis* remains insufficiently studied.

FUNDING: This study was funded by a research grant № 25-16-00145 of the Russian Science Foundation.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Раева-Богословская, Е. Н., Молканова, О. И., Крахмалева, И. Л., Кузнецова, О. А., Утянов, Д. А., Митрофанова, И. В. (2025). Хеномелес: перспективный функциональный продукт для пищевой и фармацевтической промышленности. *Пищевые системы*, 8(4), 533–540. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-4-533-540>

FOR CITATION: Raeva-Bogoslovskaya, E. N., Molkanova, O. I., Krakhmaleva, I. L., Kuznetsova, O. A., Utyanov, D. A., Mitrofanova, I. V. (2025). Chaenomeles: A promising functional product for the food and pharmaceutical industries. *Food Systems*, 8(4), 533–540. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-4-533-540>

1. Введение

Одной из главных задач государства является улучшение уровня жизни населения. В утвержденной Президентом РФ от 18 февраля 2024 г. № 145 новой Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации приоритетным является не только увеличение производства продуктов питания, но и повышение их пищевой ценности.

Современный образ жизни населения способствует увеличению доли неинфекционных заболеваний, в основе которых лежит окислительное повреждение [1]. Растения являются одним из самых богатых источников биологически активных веществ (БАВ) [2]. Кроме того, БАВ растительного происхождения характеризуются меньшей токсичностью, которая свойственна многим синтетическим органическим веществам [3]. В настоящее время активно ведется работа по исследованию и разработке функциональных пищевых продуктов [2,4,5]. Под термином «функциональный пищевой продукт» подразумевается продукт специального назначения для регулярного употребления в рационе питания здорового населения [5]. Плоды некоторых малораспространенных культур могут стать ценным источником физиологически активных ингредиентов, позволяющих обогатить рацион микронутриентами, необходимыми для поддержания здоровья человека [6]. Высокий интерес представляют культуры, содержащие большое количество веществ с радиопротекторными и антиоксидантными свойствами. Наиболее значимыми антиоксидантами плодов и ягод являются витамины, в особенности витамин С, и полифенолы. Аскорбиновая кислота (витамин С) участвует в окислительно-восстановительных реакциях, в функционировании иммунной системы, способствует усвоению железа и кроветворению [7]. Плоды и ягоды служат основными источниками полифенольных соединений в рационе человека [8]. Полифенолы плодов представлены преимущественно следующими группами соединений: флавоноиды (катехины, лейкоантоцианы, флавонолы, антоцианы); производные коричной кислоты (кофейная, феруловая, синаповая, хлорогеновая кислоты, кумарин и его гликозиды); фенол-карбоновые кислоты (протокатеховая, галловая и др.) [9]. Сельское хозяйство и промышленность направлены не только на повышение качества продукции, но и на увеличение экономической эффективности производства. Особый интерес вызывают культуры, у которых могут быть использованы все части растения [10,11]. Представители рода *Chaenomeles* Lindl. могут стать ценным ресурсом для пищевого и лекарственного производства, так как не только плоды, но и другие части растения содержат БАВ [12,13]. Многочисленные исследования подтверждают высокую профилактическую и лечебную эффективность препаратов, полученных из растений рода *Chaenomeles*, включая их противовоспалительную [14–16], противогриппозную [17] и гепатопротекторную активность [18–20], а также их эффективность в профилактике и лечении диабета [21]. Вместе с тем некоторые виды хеномелеса адаптированы для выращивания в различных регионах РФ, а сама культура характеризуется отсутствием периодичности в плодоношении, нетребовательностью к качеству почв и длительным сроком эксплуатации насаждений.

Цель исследования — анализ научной литературы, посвященной биологическим особенностям, селекции и биохимическому составу различных частей растений видов *Chaenomeles* Lindl., перспективных для выращивания на территории России.

2. Объекты и методы

Объектами являлись научные публикации российских и зарубежных исследователей, описывающие биологические и биохимические особенности представителей *Chaenomeles* Lindl. Проведен систематический поиск научных работ в поисковых системах: ResearchGate, Scopus, Web of Science, Google Scholar, Science Direct, eLibrary.Ru. Использована следующая комбинация ключевых слов на русском и английском языках: хеномелес, *Chaenomeles*, биохимический состав, биологически активные соединения, плоды, листья, семена, селекция. Проанализированы обзорные статьи, посвященные изучению биохимического состава различных частей растения хеномелеса, а также оригинальные исследования.

3. Общие сведения о некоторых представителях *Chaenomeles*

Род *Chaenomeles* Lindl., Rosaceae Juss. включает пять видов (*C. cathayensis* (Hemsl.) C. K. Schneid., *C. japonica* (Thunb.) Lindl. ex Spach, *C. sinensis* (Thouin) Koehne, *C. speciosa* (Sweet) Nakai и *C. thibetica* T. T. Yu), распространенных преимущественно в северных умеренных и субтропических регионах Юго-Восточной Азии [22]. Виды *C. cathayensis*, *C. japonica* и *C. speciosa* были использованы для создания межвидовых гибридов: *C. × superba* (*C. speciosa* × *C. japonica*), *C. × vilmoriniana*

(*C. speciosa* × *C. cathayensis*), *C. × clarkiana* (*C. japonica* × *C. cathayensis*) и *C. × californica* (*C. × superba* × *C. cathayensis*) [23–26]. Растение хеномелеса представляет собой кустарник высотой от 0,6 до 3 м с побегами с шипами и без шипов. Цветки с пятью красными, оранжевыми, редко белыми лепестками, единичные или собраны по 2–5 шт. в соцветия. Плод — яблоко диаметром 3,0–4,5 см и массой до 30 г, кожица покрыта восковым налетом [27].

Наиболее перспективными с точки зрения выращивания на территории России являются виды *C. japonica*, *C. speciosa*, *C. × superba* и *C. cathayensis*.

C. cathayensis — листопадный кустарник 2–6 м высотой с короткими шипами. Встречается на высоте 900–2500 м над уровнем моря в Китае и Южном Тибете. Листовая пластинка с пильчатым краем овальная или ланцетовидной формы. Цветки белые или розовые, диаметром до 4 см. Плодоносит обильно, плоды созревают в сентябре [28].

C. japonica распространен в центральной и южной Японии, произрастает на высоте 100–2100 м над уровнем моря на склонах холмов, берегах рек и озер. Это карликовый кустарник высотой 0,6–1,2 м с яйцевидными листьями. Цветки мелкие, чаще всего лососевого или апельсинового цвета. Небольшие плоды, по форме напоминающие яблоки, обладают характерным приятным ароматом [28].

C. speciosa встречается в Китае в горной местности на разных высотах. Вид зимостойкий и засухоустойчивый. Это листопадный кустарник высотой 2–3 м. Листья яйцевидные с зубчатыми краями, цветки часто красные, но могут быть белыми и розовыми. Плоды очень разнообразны по форме, размеру и срокам созревания [28].

C. × superba — кустарник высотой 2 м, листья похожи на листья *C. japonica*. Цветки среднего размера, могут быть белыми, розовыми, оранжевыми или красными. Плоды чаще в форме яблок, крупнее, чем у *C. japonica*, и созревают позже [28].

Селекцию сортов хеномелеса проводили в Бельгии, Великобритании, Германии, Голландии, Швейцарии, Франции, Швеции, Польше, Испании, Японии, США, в странах Балтии, Молдавии, Украине, России и Белоруссии [29–31]. В России и странах СНГ для создания сортов наиболее часто используют виды: *C. speciosa*, *C. × superba* и *C. japonica*.

В России селекцией хеномелеса активно занимаются в Федеральном государственном бюджетном учреждении наук «Орден Трудового Красного Знамени Никитский ботанический сад» — Национальный научный центр Российской академии наук» (НБС-ННЦ, Республика Крым, Ялта, пгт Никита) и в Мичуринском государственном аграрном университете (Мичуринский ГАУ, Мичуринск, Тамбовская область), где получено большое количество сортов, зарегистрированных в Госреестре (Таблица 1). Главный ботанический сад им. Н. В. Цицина РАН (ГБС РАН, Москва) присоединился к этим исследованиям в последние годы.

Сорта селекции НБС-ННЦ характеризуются большей высотой куста, диаметром, массой плода, толщиной мякоти по сравнению с сортами селекции Мичуринского ГАУ. Это можно объяснить тем, что селекция НБС-ННЦ в большей степени основана на крупноплодных, но более теплолюбивых и устойчивых к засухе видах *Chaenomeles*: *C. speciosa* и *C. × superba* [34]. В свою очередь, сорта Мичуринского ГАУ созданы на основе *C. japonica*, плоды которого меньше по размерам и массе, сами растения более низкорослые по сравнению с другими видами. Как следствие, кустарник имеет низкую степень повреждения отрицательными температурами, так как почти полностью укрыт снежным покровом [35].

3.1. Биохимический состав плодов

Плоды видов рода *Chaenomeles* содержат витамины, пектины, минеральные элементы, органические кислоты [36–42]. Кроме того, отмечены выраженные антиканцерогенные свойства экстрактов из хеномелеса. Показана эффективность использования плодов *C. japonica*, в частности против рака молочной железы [43] и рака толстой кишки [44,45]. Недавние исследования выявили иммунорегуляторные и противопаркинсонические свойства экстрактов плодов хеномелеса [17]. Подавляющее большинство результатов исследований свидетельствует о том, что биологическая активность препаратов в наибольшей степени связана с наличием полифенолов [20].

Плоды *C. japonica* богаты органическими кислотами, в основном яблочной, а также хиной и янтарной. Первая обуславливает высокую кислотность и низкий уровень pH (2,4–2,8) плода. Кислотность плодов колеблется от 2,6 до 5,6 % в пересчете на лимонную кислоту [46]. Плоды *C. japonica* содержат мало моносахаридов (доля фруктозы 6,31 г/100 г СВ, доля глюкозы 10,95 г/100 г СВ) и значительное количество полисахаридов, включая целлюлозу, гемицеллюлозу и пекти-

Таблица 1. Характеристика сортов отечественной селекции [32,33]
Table 1. Characteristics of the cultivars of the domestic selection [32,33]

Сорт	Происхождение	Габитус	Высота куста, м	Шипы	Диаметр плода, см	Масса плода, г	Толщина мякоти, мм
Сорта селекции Мичуринского ГАУ							
Альбатрос	<i>C. speciosa</i>	Раскидистый	до 0,7	нет	4,3	35	8–11
Алюр	<i>C. japonica</i>	Раскидистый	до 0,8	нет	4,5	30	10
Восход	<i>C. japonica</i>	Прямостоячий	до 1	нет	до 5	70	11
Жар-Птица	<i>C. × superba</i>	Полураскидистый	до 1	редкие	4,5–5,0	35	8–10
Мичуринский Витамин	<i>C. japonica</i>	Раскидистый	до 0,7	нет	до 5	40	11
Мичуринское Чудо	<i>C. speciosa</i>	Полураскидистый	до 0,8	редкие	4,5	40	9–10
Флагман	<i>C. speciosa</i>	Раскидистый	до 0,4	редкие	до 5	60–75	13–15
Шарм	<i>C. japonica</i>	Раскидистый	до 0,7	нет	4,8	60–70	10
Сорта селекции НБС-ННЦ							
Граф де Рамок	<i>C. speciosa</i>	Полураскидистый	1,5	есть	4,5	40	10
Димитрина	<i>C. × superba</i>	Раскидистый	до 1,2	редкие	до 6	60	13–14
Кандея	<i>C. × superba</i>	Компактный	до 1,2	есть	5,5	60	13
Красавица Мадлен	<i>C. speciosa</i>	Полураскидистый	1,5	есть	5,5	60	12
Мимка	<i>C. × superba</i>	Полураскидистый	1	нет	4,0–4,5	45	–
Перуника	<i>C. speciosa</i>	Полураскидистый	1,7	есть	–	65	13–16
Статс-Дама	<i>C. × superba</i>	Полураскидистый	1,6	есть	до 5,0	40	до 10

ны, которые входят в состав пищевых волокон [47]. Сто грамм сухого вещества плода содержат 18 г целлюлозы и 3 г гемицеллюлозы. Среднее содержание пектина составляет 11 г/100 г СВ (1,4 г/100 г СВ). Эти значения сопоставимы с содержанием пектинов в яблоках. Пектины в основном находятся в мякоти плода [36].

Согласно исследованиям Ду и др. [48], для плодов видов хеномелеса характерен различный уровень суммарных фенольных соединений. Например, *C. japonica* содержал наименьшее количество фенольных соединений (19,35 мг GAE/г FM) среди пяти изучаемых видов, тогда как *C. speciosa* — 46,92 мг/г FM. Urbanaviciute и соавт. [40] ранее проанализировали содержание фенолов в сортах плодов *C. japonica* и показали значительное различие между сортами Darius, Rasa и Rondo. Авторы заявили, что для сорта Rasa характерно самое высокое содержание фенольных соединений (4366 мг GAE/100 г DM). В сортах отечественной селекции, в частности Мичуринского ГАУ, содержание полифенолов в плодах варьировало от 96,2 мг/100 г у сорта «Жар-Птица» до 275,7 мг/100 г у сорта «Мичуринский Витамин» [42].

Исследование с использованием ВЭЖХ-ДДМ/ЭСИ-МС/МС показало, что плоды *C. japonica* содержат 24 фенольных соединения, из которых 20 являются флаван-3-олами, такими как катехин, эпикатехин и процианидины, которые составляют примерно 94–99% от всех полифенолов.

Lykholat и др. [49] изучали содержание полифенолов в кожуре и мякоти плодов *C. cathayensis* и установили, что экстракт из кожуры содержит значительно больше полифенолов по сравнению с экстрактом из мякоти. В кутикулярных восках *C. cathayensis* преобладающими соединениями были тетрапентаконтан (21,8% от общего количества) и гептакозаналь (23,1% от общего количества) соответственно [49]. Также высокое содержание полифенолов выявлено в соке из плодов *C. cathayensis* (591 мг/100 мл), тогда как в соке из плодов *C. japonica* оно составляет около 400 мг/100 мл [47].

Наибольшее содержание хлорогеновой кислоты было отмечено в *C. speciosa* (1,82 мг/г FW) и в *C. cathayensis* (1,19 мг/г FW), тогда как в плодах *C. japonica* хлорогеновая кислота была обнаружена в низких концентрациях — 0,10 мг/г FW. Виды *C. speciosa* и *C. japonica* характеризовались высоким содержанием эпикатехина (2,35 мг/г FM и 1,02 мг/г FM соответственно) и процианидина B2 (2,96 мг/г FM и 0,98 мг/г FM соответственно). Strugała и др. [14] отметили более высокое содержание фенольных соединений в плодах вида *C. speciosa*. Содержание процианидина B1 составило 3,60 мг/г сухого вещества экстракта, процианидина B2—115,88 мг/г сухого вещества экстракта, а эпикатехина — 123,31 мг/г сухого вещества экстракта. По данным Lewandowska и соавторов [43], флавонолы составляют 53,5% от всех полифенолов, а катехин и эпикатехин — 16,0% и 9,8% от общего содержания полифенолов соответственно.

Содержание витамина С в плодах определяется генотипом растения, годом сбора урожая, а также влажностью воздуха и температурой в период роста. В зависимости от условий окружающей среды среднее содержание витамина С в плодах *C. japonica* варьировало от 172,6 до 243 мг/100 г [39]. Результаты исследований показывают, что

плоды, собранные в более теплый и засушливый год, характеризуются более высоким содержанием витамина С. Уровень витамина С в плодах также определяется продолжительностью их хранения. После одной недели хранения плодов были отмечены потери витамина С в размере 15,5% в 2009 году и 6,3% в 2010 году. После двухнедельного периода хранения наблюдались более высокие потери витамина С: 24,3% в 2009 году и 15,8% в 2010 году [39]. Комар-Темная и др. в своем исследовании выявили наибольшее накопление аскорбиновой кислоты у генотипов *C. speciosa* и *C. cathayensis* (244,58 и 258,25 мг/100 г) [50]. В свою очередь, Hellin и др. также обнаружили высокое содержание витамина С в соке из плодов *C. speciosa*, *C. cathayensis* и *C. × superba* (102, 103 и 109 мг/100 мл соответственно) в сравнении с *C. japonica* (45–78,5 мг в 100 мл) [47]. Vyszkievicz и соавторы [51] показали наличие других витаминов в изученных сортах хеномелеса.

Наибольшее содержание ниацина (2,04 и 2,07 мг/100 г соответственно) из исследуемых генотипов отмечено у сортов Cido (*C. japonica*). Хеномелес также является ценным по содержанию минеральных веществ, включая магний, кальций, калий, натрий, цинк, железо и медь. Калий заслуживает особого внимания, поскольку он составляет наибольшую долю среди перечисленных компонентов. Его содержание в виде *C. speciosa* составляет 84,7–147,0 мг/100 г, тогда как в *C. japonica* — 249,0 мг/100 г [21].

Содержание сухого вещества (СВ) в плодах *C. × superba* составляет 17,00 мг/100 г свежего вещества (СВ) и 15,51 мг/100 г СВ соответственно [52]. *C. superba* и грушевидные плоды *C. japonica* имели высшее содержание общих полифенолов среди изучаемых объектов. У *C. superba* концентрация фенольных кислот (10,69 мг/100 г сырого веса) была выше, чем концентрация флавоноидов (7,64 мг/100 г сырого веса). Хлорогеновая кислота (4,57/100 г сырой массы) была преобладающим соединением. Однако Turkiewicz и др. [53] обнаружили, что процианидин B2 является преобладающим соединением во всех исследованных сортах плодов *C. × superba*.

Ponder и др. [52] и Turkiewicz и др. [53] охарактеризовали плоды *C. superba* и обнаружили фенольные кислоты (галловую, хлорогеновую, криптохлорогеновую, кофейную, п-кумаровую), флавонолы (кверцетин-3-О-рутинозид, мирицетин, кверцетин, лютеолин) и флаван-3-олы (катехин, эпикатехин, процианидины B2, B3 и C1, а также неидентифицированные димеры, тримеры и тетрамеры процианидинов).

3.2. Биохимический состав листьев

В научной литературе представлено множество исследований фенольного профиля плодов хеномелеса и их биологической активности, включая антиоксидантную, антипролиферативную, проапоптотическую, цитотоксическую, противораковую, противовоспалительную и гипогликемическую [43–55]. Однако лишь немногие публикации касаются фенолов и их биологического потенциала в листьях растения [40,55,56]. В 2015 году ученые определили и сравнили химический состав экстрактов плодов и листьев хеномелеса

японского [56]. Экстракт листьев содержал примерно на 10 % меньше фенольных соединений, чем экстракт плодов. Хлорогеновая кислота была основным компонентом экстрактов листьев, ее доля варьировала от 78,76 % до 86,55 % от общего содержания. Хроматик и соавт. в 2018 году изучили содержание вторичных метаболитов в листьях в процессе вегетации [28]. Общее содержание фенолов в листьях растений *Chaenomeles*, измеренное во время цветения, превышало таковое в плодах: наибольшее накопление полифенолов было выявлено в листьях гибридного вида *C. × superba* ($4476,1 \pm 122,2$ mg GAE/100), среднее — у *C. japonica* ($4307,1 \pm 111,3$ mg GAE/100) и наименьшее — в листьях *C. speciosa* ($2928,0 \pm 142,2$ mg GAE/100 g WW) [28].

В 2019 году Kikowska и ее коллеги описали содержание полифенолов, фенольных кислот и флавоноидов в этанольных экстрактах из листьев растений *C. japonica*, размноженных *in vitro* и выращенных в полевых условиях [55]. Анализ экстрактов листьев растений, выращенных в полевых условиях, и листьев регенерантов из культуры *in vitro* методом ВЭЖХ–МС показал содержание изомеров хлорогеновой кислоты и флавоноидов, в основном кверцетина, а также производных кемпферола. Однако в листьях, полученных из открытого грунта, концентрация описанных веществ была выше. В свою очередь, антиоксидантная активность экстрактов листьев из различных условий культивирования была одинаковой. Также заслуживает внимания работа Teleszko с соавторами [56], посвященная изучению антиоксидантных свойств экстрактов листьев и плодов *C. japonica*. Исследование показало, что антиоксидантная активность экстракта листьев примерно в два раза выше, чем у экстракта плодов [56]. Chojnacka и др. [57] выявили антиоксидантный эффект как очищенного богатых фенолами экстракта (ОБФЭ), так и сырого фенольного экстракта (СФЭ). В статье было показано, что ОБФЭ обладает почти в 2 раза более высокой антиоксидантной активностью по сравнению с СФЭ и оказывает более сильное цитотоксическое действие на линии клеток рака толстой кишки [57].

В экстракте листьев *C. × superba* идентифицировали 6 фенольных кислот: неохлорогеновую, димер кофейной кислоты/кофеилгексозид, хлорогеновую, изомер п-кумароилгексозида 1, изомеры п-кумароил-хинной кислоты 2 и 3 и одно неидентифицированное производное гидроксикоричной кислоты. Среди флавоноидов были установлены флавонолы (дигидрокверцетин-гексозид, кверцетин-3-О-рутинозид, кверцетин-3-О-галактозид, кверцетин-3-О-глюкозид, кемпферол-3-О-гексозид, кемпферол-3-О-рутинозид, кемпферол-гексозид-дезоксигексозид), флаваноны (нарингенин-7-О-гексозид) и флавоны (лютеолин-3-О-рутинозид, лютеолиндигексозид), а также гидрокситирозол — нефлавоноидное фенольное соединение. В листьях *C. superba* были обнаружены производные кверцетина (галактозид, рутинозид, глюкозид). Кроме того, были выявлены п-кумаровая кислота, флаван-3-олы, катехин и эпикатехин, а также процианидины B1, B2, B3 и C1. В экстракте *C. superba* общее количество фенольных кислот ($644,16$ мкг/мл листьев) было выше, чем общее количество флавоноидов ($496,75$ мкг/мл). Хлорогеновая кислота была основным компонентом (23,39 % от всех представленных соединений). Нарингенин-7-О-гексозид был преобладающим флавоноидом (17,76 % от всех представленных соединений) [58]. Экстракты листьев *C. superba* оказались наиболее активными не только против грамположительного *S. aureus*, но против *E. coli*, *P. aeruginosa* и *C. albicans* [58,59].

3.3. Биохимический состав семян

Анализируя литературу, можно отметить, что семена хеномелеса в большей степени изучали в качестве источника масла, о чем свидетельствуют научные исследования в этой области [60,61,62]. Наибольшее содержание общих сахаров было обнаружено в образцах, относящихся к *C. japonica* (37,3 мг/г семян), а наименьшее — к *C. × superba* Jest Trail (12,4 мг/г семян). Основным идентифицированным сахаридом была глюкоза, за которой следовали сахароза и фруктоза (составляющие 58,6, 31,1 и 8,8 % от общего содержания сахаров соответственно). На основании исследований Хеллина и соавторов, проведенных в 2003 году, можно отметить, что среднее содержание общего сахара в семенах (24,3 мг/г семян) составляет половину от среднего содержания, обнаруженного в плодах хеномелеса ($55,8$ мг/г свежих плодов) [47].

Более 77,7 % от общего содержания кислот приходится на галактуроновую, глюкуроновую, лимонную и уксусную. Остальные кислоты можно расположить в следующем порядке убывания содержания: янтарная > хинная > яблочная > щавелевая > адипиновая > шикимовая > фумаровая. Наибольшее содержание общих кислот было обнаружено в семенах *C. japonica* (68,2 мг/г семян), а наименьшее — в *C. speciosa* Simonii (32,8 мг/г семян). Содержание галактуроновой кислоты, которая является основным строительным блоком пекти-

нов, в среднем составляло 10,9 мг/г семян, а глюкуроновой — 9,36 мг/г семян. В подавляющем большинстве общее содержание фенольных соединений было представлено полимерными фенолами (в среднем 93,9 %). Флаван-3-олы и фенольные кислоты были в меньшинстве и составляли в среднем 5,9 и 0,2 % ОСФ соответственно. Семена *Chaenomeles* содержат множество фенольных соединений. Семена *C. speciosa* сорта Simonii характеризовались низким содержанием фенольных кислот и флаван-3-олов (0,03 и 1,15 мг/г семян соответственно), тогда как высокие концентрации были зарегистрированы в семенах *C. × superba* сортов Crimson and Gold (0,40 и 3,56 мг/г семян соответственно) [63].

Терпены — распространенные в природе органические соединения, построенные из изопреновых звеньев (2-метилбутадиена-1,3, C_5H_8) [64]. Они обладают антимикробными, противовоспалительными, антиоксидантными и успокаивающими свойствами, что позволяет использовать их в медицине для лечения мочекаменной болезни, в качестве антисептиков и муколитических средств, а также компонентов лекарств с обезболивающим и спазмолитическим действием. Сравнение содержания тритерпенов в плодах, листьях и семенах хеномелеса показывает, что семена являются наиболее богатым источником этих соединений.

Проведенные исследования доказали, что семена *Chaenomeles* являются источником 13 тритерпенов, из которых олеаноловая кислота была доминирующим соединением (до 17,2 мг/г семян для *C. japonica* Red Joy). Проанализированные семена содержали все девять незаменимых аминокислот (АА), а семена *C. × superba* Jet Trail (1375 мкг/г семян) были наиболее богаты этими соединениями. Более того, О-фосфо-L-серин являлся доминирующей аминокислотой (в среднем 35,9 % от всех аминокислот). Среди токохроманолов наиболее распространенными гомологами были α-токоферол и α-токотриенол. Семена *C. japonica* wild #3 имели самую высокую концентрацию токохроманолов (19,2 мкг/г семян), а токоферолов было в среднем в 15 раз больше, чем токотриенолов. Семена *Chaenomeles* характеризуются низким содержанием натрия и благоприятным соотношением натрия к калию. По сравнению со всеми протестированными сортами, семена *C. japonica* #1 имели самое высокое содержание железа и меди (72,2 и 16,4 мкг/г семян соответственно). Кроме того, семена *Chaenomeles* оказались важным источником цинка, концентрация которого была выше, чем в наиболее распространенных фруктах [63].

4. Перспективы применения *Chaenomeles* в пищевой промышленности и фармацевтике

Применение *Chaenomeles* в пищевой промышленности целесообразно благодаря высокой антиоксидантной активности компонентов, входящих в состав как плодов, так и листьев. Как было сказано ранее, в работе Ros и соавторов [46] показано, что плоды *Chaenomeles* богаты органическими кислотами. Помимо этого, в соках, полученных из плодов, содержание витамина С может достигать 60 мг/100 мл [46]. Витамин С широко применяется в мясной промышленности в качестве антиоксидантного агента, который помогает значительно замедлить процесс окислительной порчи жиров. Он также используется в винодельческой промышленности, пивоварении, при приготовлении рыбной продукции, а также при производстве свежемороженой ягод и фруктов. Не стоит забывать, что витамин С не синтезируется в человеческом организме, в связи с чем его высокое содержание в экстрактах из плодов *Chaenomeles* делает их перспективными для использования в пищевой промышленности. Норма потребления этого витамина для взрослого человека составляет 60 мг в сутки, и 100 мл сока из плодов *Chaenomeles* полностью покрывают эту потребность. Возможность использования *Chaenomeles* в качестве источника антиоксидантов для продления сроков годности пищевой продукции отмечают Hui Du с соавторами [48].

В работе Rui Zhang и др. [65] представлен обзор методов получения и возможного применения около 150 химических соединений, обнаруженных в различных частях *Chaenomeles*. Среди них преобладают тритерпеноиды, флавоноиды и фенольные соединения, которые, помимо высокой антиоксидантной активности, обладают гепатопротекторными, противовоспалительными, иммунорегуляторными и антимикробными свойствами. Авторы приводят данные не только о полезном составе *Chaenomeles*, но и о способах экстракции и получения широкого спектра соединений, которые можно в дальнейшем использовать в пищевой и фармацевтической промышленности, а также в производстве БАДов.

Высокое содержание пектинов в плодах *Chaenomeles* [36] обещает возможность развития еще одного направления использования плодов в пищевой промышленности. При производстве

пищевых продуктов пектины применяются в качестве желирующего, загущающего и структурообразующего вещества. Благодаря этим свойствам пектины широко используются в производстве джемов, варенья, мармелада, фруктовых начинок и желе, для формирования вязкости соусов и фруктовых пюре, для стабилизации и эмульгирования питьевых кисломолочных продуктов и соусов на основе масла, для структурообразования кондитерских изделий и творожных масс. Пектин также используют для капсулирования: пектиновые оболочки обеспечивают доставку биологически активных веществ в целевые отделы организма человека. В основном пектины получают из яблок и цитрусовых, однако плоды *Chaenomeles*, как было сказано ранее, содержат сопоставимое с яблоками количество пектинов, что делает их перспективным источником для их производства. Но не только пектин из плодов можно использовать в качестве загустителя. В работе [66] была получена камедь из семян плодов *Chaenomeles*. Авторы исследовали состав полученной камеди и установили, что она состоит в основном из арабинозы, глюкозы, ксилозы, галактуроновой и глюкуроновой кислот. Авторы называют полученную ими камедь потенциальным загустителем, который можно использовать как в пищевой, так и в фармацевтической промышленности.

Turkiewicz с соавторами [67] показали, что полифенолы из сока плодов *Chaenomeles* хорошо сохраняются при использовании различных типов сушки: сублимационной, вакуумной и распылительной. Авторы отмечают, что применение сублимационной сушки позволяет сохранить полифенолы в наибольшей степени. Аналогичные результаты по сохранению фенолов в экстрактах *Chaenomeles* были получены и в других работах [68]. Антиоксидантные и антидиабетические свойства продемонстрировали экстракты, полученные с использованием вакуумной сушки.

Побочные продукты переработки *Chaenomeles* также могут быть использованы в производстве. Из жмыха *Chaenomeles* был получен белковый изолят, который содержал все незаменимые для человека аминокислоты [69].

Богатый состав различных частей *Chaenomeles* делает его перспективным не только для непосредственного употребления плодов в пищу, но и для более широкого применения в пищевой и фармацевтической промышленности. С помощью экстрактов из *Chaenomeles* можно улучшить пищевые характеристики продуктов питания, усовершенствовать существующие рецептуры. Как плоды, так и экстракты из плодов и листьев *Chaenomeles* обладают большим разнообразием химических соединений, представляющих высокую биологическую ценность для человека.

Плоды хеномелеса успешно используют в традиционной китайской медицине как эффективное противокашлевое, обезболивающее и мочегонное средство. Экстракты хеномелеса, богатые флавонолами, оказывали антипролиферативное действие на раковые клетки, снижая их инвазивность, регулируя работу генов, участвующих в апоптозе, ангиогенезе и метастазировании [43,45]. В опытах с экстрактами также продемонстрировано их ингибирующее действие на активность ферментов ММП-2 и ММП-9, что может быть использовано в химиопрофилактике рака [54]. Применение экстрактов обеспечивало защиту липидов биологических мембран от окисления, а в качестве антиоксидантного препарата может использоваться для профилактики заболеваний, вызванных воспалением или окислительным стрессом [14,70]. Более того, клетки

гепатомы человека HepG2, предварительно обработанные экстрактами *C. japonica*, богатыми фенолами, в качестве модуляторов углеводного обмена, показали многообещающий гипогликемический эффект и снижение внутриклеточного накопления активных форм кислорода [20]. Благодаря высокому содержанию биокомпонентов, положительно влияющих на здоровье человека, плоды, листья и побочные продукты сортов *C. japonica* являются отличным сырьем для производства функциональных продуктов питания, что позволяет повысить содержание антиоксидантов в готовых продуктах. Более того, экстракты из плодов, их выжимки, листьев и семян могут быть использованы в качестве антибактериального средства и заменителя химических консервантов как в пищевой, так и в косметической промышленности [71].

Исследования показывают, что семена *C. japonica* пригодны для получения масла, богатого α -токоферолом, каротиноидами, скваленом, фитостеролами, фенолами, а также линолевой и олеиновой кислотами [72–75]. Стоит отметить, что семена, оставшиеся после переработки, могут быть ценным источником масла. Выход и биохимический состав масел зависят как от предварительной обработки семян, так и от метода экстракции масла [72]. Профиль жирных кислот и содержание БАВ в семенах в большей степени связан с сортом, в то время как на выход масла влияет способ экстракции [76]. Слизь из семян хеномелеса успешно применяется для лечения ран и повреждений кожи, вызванных токсинами [77].

Этанольный экстракт из семян айвы защищает кожу от воспаления Th2-типа, вызванного аллергенами, и уменьшает проявления атопического дерматита [78]. Кроме того, семена айвы могут использоваться в средствах по уходу за кожей в качестве превосходного эмульгатора и стабилизатора [79].

Результаты анализов *in vitro* показали, что экстракты целых плодов хеномелеса ингибируют активность протеаз внеклеточного матрикса дермы: эластазы и коллагеназы. Экстракт целых плодов (с семенами) проявлял более выраженный ингибирующий эффект на активность эластазы, чем экстракт мякоти (без семян). В частности, среди трех изученных свойств экстракт саркокарпа проявил наиболее выраженное ингибирующее действие на активность коллагеназы при низких концентрациях. Богатая полифенолами фракция, полученная из сочной мякоти плода, продемонстрировала значительное ингибирование коллагеназы. На основании этих данных мы пришли к выводу, что фенольные соединения из сочной мякоти плодов обладают потенциалом защиты кожи от старения благодаря антиколлагеназной активности [80].

5. Выводы

Анализ источников литературы показал возможность использования различных видов хеномелеса (*C. japonica*, *C. speciosa*, *C. × superba* и *C. cathayensis*), как перспективной плодовой культуры, для получения продуктов питания и лекарственного сырья на территории РФ. Плоды, листья и семена представителей рода *Chaenomeles* характеризуются высоким содержанием биологически активных веществ, в особенности полифенолов и хлорогеновой кислоты. Большая часть исследований описывает биохимический состав плодов и продуктов переработки этой ценной культуры. Среди исследуемых видов наиболее изучены *C. japonica*, *C. speciosa*, в то время как по *C. cathayensis* представлено меньше всего работ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / REFERENCES

- Halliwell, B., Rafter, J., Jenner, A. (2005). Health promotion by flavonoids, tocopherols, tocotrienols, and other phenols: Direct or indirect effects? Antioxidant or not? *The American Journal of Clinical Nutrition*, 81(1), 268S–276S. <https://doi.org/10.1093/ajcn/81.1.268S>
- Essa, M. M., Bishir, M., Bhat, A., Chidambaram, S. B., Al-Balushi, B., Hamdan, H. et al. (2023). Functional foods and their impact on health. *Journal of Food Science and Technology*, 60(3), 820–834. <https://doi.org/10.1007/s13197-021-05193-3>
- Меньшикова, Е. Б., Ланкин, В. З., Кандалинцева, Н. В. (2012). Фенольные антиоксиданты в биологии и медицине. Структура, свойства, механизмы действия. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012. [Menshchikova, E. B., Lankin, V. Z., Kandallintseva, N. V. (2012). Phenolic antioxidants in biology and medicine. Structure, properties, mechanisms of action. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012. (In Russian)]
- Лесникова, Н. А., Кокорева, Л. А., Пишиков, Г. Б., Протасова, Л. Г. (2019). Перспективы применения нетрадиционного растительного сырья для создания новых продуктов питания. *Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий*, 81(4), 89–97. [Lesnikova, N. A., Protasova, L. G., Kokoreva, L. A., Pishchikov, G. B. (2019). Prospects for the use of non-traditional vegetable raw materials for the creation of new food products. *Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies*, 81(4), 89–97. (In Russian)] <http://doi.org/10.20914/2310-1202-2019-4-89-97>
- Борисова, А. В., Шаярова, М. В., Шишкина, Н. Ю. (2021). Функциональные продукты питания: связь между теорией, производством и потребителем. *Новые технологии*, 17(1), 21–32. [Borisova, A. V., Shayarova, M. V., Shishkina, N. Yu. (2021). Functional food products: The relationship between the theory, the production and a consumer. *New Technologies*, 17(1), 21–32. (In Russian)] <https://doi.org/10.47370/2072-0920-2021-17-1-21-32>
- Жбанова, Е. В., Жидехина, Т. В., Акимов, М. Ю., Родионова, О. С., Хромов, Н. В., Гурьева, И. В. (2021). Плоды сортов ягодных и нетрадиционных садовых культур, выращенных в Черноземье, — ценные источники незаменимых микронутриентов. *Пищевая промышленность*, 3, 8–11. [Zhananova, E. V., Zhidekhina, T. V., Akimov, M. Yu., Rodyukova, O. S., Khromov, N. V., Gur'eva, I. V. (2021). The fruits varieties of berry-like and nontraditional horticultural crops grown in Black Soil zone are the valuable sources of indispensable micronutrients. *Food Industry*, 3, 8–11. (In Russian)] <https://doi.org/10.24412/0235-2486-2021-3-0020>
- Bastias, J. M., Cepero, Y. (2016). La vitamina C como un eficaz micronutriente en la fortificación de alimentos. *Revista Chilena de Nutrición*, 43(1), 81–86. [Bastias, J. M., Cepero, Y. (2016). Vitamin C as an effective micronutrient in the food fortification. *Revista Chilena de Nutrición*, 43(1), 81–86. (In Spanish)] <https://doi.org/10.4067/S0717-75182016000100012>
- Seeram, N. P. (2008). Berry fruits: Compositional elements, biochemical activities, and the impact of their intake on human health, performance, and dis-

- ease. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 56(3), 627–629. <https://doi.org/10.1021/jf071988k>
9. Акимов, М. Ю., Макаров, В. Н., Жбанова, Е. В. (2019). Роль плодов и ягод в обеспечении человека жизненно важными биологически активными веществами. *Достижения науки и техники АПК*, 33(2), 56–60. [Акимов, М. Ю., Макаров, В. Н., Жбанова, Е. В. (2019). Role of fruits and berries in providing human with vital biologically active substances. *Achievements of Science and Technology in Agro-Industrial Complex*, 33(2), 56–60. (In Russian)] <https://doi.org/10.24411/0235-2451-2019-10214>
10. Винницкая, В. Ф., Соломатина, Е. А., Круглов, Н. М., Палфитов, В. Ф. (2020). Исследования содержания биологически-активных веществ в листьях плодовых культур и растительных экстрактах на их основе. *Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК — продукты здорового питания*, 2, 115–121. [Vinnitskaya, V. F., Solomatina, E. A., Kruglov, N. M., Palfitov, V. F. (2020). Investigation of the content of biologically active substances in the leaves of fruit crops and plant extracts based on them. *Technologies of the Food and Processing Industry of the Agro-Industrial Complex-Healthy Food Products*, 2, 115–121. (In Russian)] <https://doi.org/10.24411/2311-6447-2020-10050>
11. Березина, Н. А., Хмелева, Е. В. (2023). Анализ современного состояния применения вторичного растительного сырья пищевой промышленности: обзор предметного поля. *Хлебопечение России*, 67(1), 17–33. [Berezina, N. A., Khmel'eva, E. V. (2023). Analysis of the current state of application of secondary plant raw materials in the food industry. *Bakery of Russia*, 67(1), 17–33. (In Russian)]
12. Kostecka-Gugała, A. (2024). Quinces (*Cydonia oblonga*, *Chaenomeles* sp., and *Pseudocydonia sinensis*) as medicinal fruits of the Rosaceae family: Current state of knowledge on properties and use. *Antioxidants*, 13(1), Article 71. <https://doi.org/10.3390/antiox13010071>
13. Marat, N., Danowska-Oziewicz, M., Narwojsz, A. (2022). *Chaenomeles* species — characteristics of plant, fruit and processed products: A review. *Plants*, 11(22), Article 3036. <https://doi.org/10.3390/plants11223036>
14. Strugała, P., Cyboran-Mikołajczyk, S., Dudra, A., Mizgier, P., Kucharska, A. Z., Olejniczak, T. et al. (2016). Biological activity of Japanese quince extract and its interactions with lipids, erythrocyte membrane, and human albumin. *The Journal of Membrane Biology*, 249(3), 393–410. <https://doi.org/10.1007/s00252-016-9877-2>
15. Han, Y.-K., Kim, Y.-S., Natarajan, S.B., Kim, W.-S., Hwang, J.-W., Jeon, N.-J. et al. (2016). Antioxidant and anti-inflammatory effects of *Chaenomeles sinensis* leaf extracts on LPS-stimulated RAW 264.7 cells. *Molecules*, 21(4), Article 422. <https://doi.org/10.3390/molecules21040422>
16. Suh, W. S., Park, K. J., Kim, D. H., Subedi, L., Kim, S. Y., Choi, S. U. et al. (2017). A biphenyl derivative from the twigs of *Chaenomeles speciosa*. *Bioorganic Chemistry*, 72, 156–160. <https://doi.org/10.1016/j.bioorg.2017.04.003>
17. Zhang, S.-Y., Han, L.-Y., Zhang, H., Xin, H.-L. (2014). *Chaenomeles speciosa*: A review of chemistry and pharmacology. *Biomedical Reports*, 2(1), 12–18. <https://doi.org/10.3892/br.2013.193>
18. Ma, B., Wang, J., Tong, J., Zhou, G., Chen, Y., He, J. et al. (2016). Protective effects of *Chaenomeles thibetica* extract against carbon tetrachloride-induced damage via the MAPK/Nrf2 pathway. *Food and Function*, 7(3), 1492–1500. <https://doi.org/10.1039/c5fo01430a>
19. Baranowska-Bosiacka, I., Bosiacka, B., Rast, J., Gutowska, I., Wolska, J., Rębacz-Maron, E. et al. (2017). Macro- and microelement content and other properties of *Chaenomeles japonica* L. fruit and protective effects of its aqueous extract on hepatocyte metabolism. *Biological Trace Element Research*, 178(2), 327–337. <https://doi.org/10.1007/s12011-017-0931-4>
20. Zakłós-Szyda, M., Pawlik, N. (2018). Japanese quince (*Chaenomeles japonica* L.) fruit polyphenolic extract modulates carbohydrate metabolism in HepG2 cells via AMP-activated protein kinase. *Acta Biochimica Polonica*, 65(1), 67–78. <https://doi.org/10.18388/abp.2017.1604>
21. Watychowicz, K., Janda, K., Jakubczyk, K., Wolska, J. (2017). *Chaenomeles* — health promoting benefits. *Roczniki Państwowego Zakładu Higieny*, 68(3), 217–227.
22. Lácis, G., Kārkliņa, K., Bartulsons, T., Kaufmane, E. (2024). Intergenic transfer of simple sequence repeat molecular markers for the study of *Chaenomeles* as fruit crop breeding material. *Horticulture*, 10(11), Article 1235. <https://doi.org/10.3390/horticulture10111235>
23. Rumpunen, K., Kviklys, D., Kaufmane, E., Garkava, L. (1998). Breeding *Chaenomeles* — A new aromatic fruit crop. *Acta Horticulturae*, Article 484, 211–216. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.1998.484.3>
24. Bartish, I. V., Garkava, L. P., Rumpunen, K., Nybom, H. (2000). Phylogenetic relationships and differentiation among and within populations of *Chaenomeles* Lindl. (Rosaceae) estimated with RAPDs and isozymes. *Theoretical and Applied Genetics*, 101(4), 554–563. <https://doi.org/10.1007/s001220051515>
25. Kaufmane, E., Ruissa, S. (2020). Breeding of new cultivars of the fruit crop Japanese quince (*Chaenomeles japonica*) in Latvia. *Acta Horticulturae*, 1281, 51–58. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2020.1281.9>
26. Sun, J., Wang, Y., Liu, Y., Xu, C., Yuan, Q., Guo, L. et al. (2020). Evolutionary and phylogenetic aspects of the chloroplast genome of *Chaenomeles* species. *Scientific Reports*, 10(1), Article 11466. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-67943-1>
27. Клименко, С. В., Недвига, О. Н. (1999). Хеномелес: интродукция, состояние и перспективы культуры. *Интродукция растений*, 3–4, 125–134. [Klimenko, S. V., Nedviga, O. M. (1999). Flowering quince: Introduction, present condition and prospects of the culture. *Plant Introduction*, 3–4, 125–134. (In Russian)]
28. Khromykh, N., Lykholat, Y., Shupranova, L., Kabar, A., Didur, O., Lykholat, T. et al. (2018). Interspecific differences of antioxidant ability of introduced *Chaenomeles* species with respect to adaptation to the steppe zone conditions. *Bio-systems Diversity*, 26(2), 132–138. <https://doi.org/10.15421/011821>
29. Меженский, В. Н. (2010). Помологическая ценность декоративных сортов хеномелеса. *Современное садоводство*, 1, 25–28. [Mezhenskiy, V. M. (2010). The pomological value of Japanese Quinces ornamental cultivars. *Contemporary Horticulture*, 1, 25–28. (In Russian)]
30. Пигуль, М. Л., Шалкевич, М. С., Остапчук, И. Н. (2022). Биохимический состав плодов хеномелеса японского (*Chaenomeles japonica* (Thunb.) Lindl. ex Spach) в условиях Беларуси. *Плодоводство*, 34(1), 43–47. [Pigul, M. L., Shalkevich, M. S., Ostapchuk, I. N. (2022). Biochemical composition of *Chaenomeles japonica* fruits (*Chaenomeles japonica* (Thunb.) Lindl. ex Spach) in the conditions of Belarus *Fruit Growing*, 34(1), 43–47. (In Russian)] <https://doi.org/10.47612/0134-9759-2022-34-43-47>
31. Rumpunen K. (2022). *Chaenomeles*: Potential new fruit crop for northern Europe. Chapter in a book: Trends in New Crops and New Uses. Alexandria: ASHS Press. 2002.
32. Кукулина, А. Г., Комар-Темная, Л. Д., Федулова, Ю. А. (2020). Оценка новых российских сортов хеномелеса (*Chaenomeles* Lindl.). *Бюллетень Главного ботанического сада*, 1, 46–56. [Kuklina, A. G., Komar-Tyomnaya, L. D., Fedulova, Yu. A. (2020). Assessment of new Russian *Chaenomeles* Lindl. Cultivars. *Bulletin of the Central Botanical Garden*, 1, 46–56. (In Russian)]
33. ФГБУ «Госсорткомиссия». Каталог селекционных достижений. Электронный ресурс <https://gossortrf.ru/activity/#activity-registry> Дата доступа 29.10.2025 [Federal State Budgetary Institution "Gossortkommission". Catalog of breeding achievements. Retrieved from <https://gossortrf.ru/activity/#activity-registry>. Accessed October 29, 2025 (In Russian)]
34. Пилькевич, Р. А., Комар-Темная, Л. Д. (2015). Динамика водного режима хеномелеса в условиях летнего периода Южного берега Крыма. Сборник научных трудов Государственного Никитского ботанического сада, 140, 195–205. [Pilkevitch, R. A., Komar-Tyomnaya, L. D. (2015). Water regime dynamics of *Chaenomeles* in the South of Crimea. Works of the State Nikita Botanical Garden, 140, 195–205. (In Russian)]
35. Weber, C. (1964). The genus *Chaenomeles* (Rosaceae). *Journal of the Arnold Arboretum*, 45(3), 161–205.
36. Thomas, M., Guillemin, F., Guillon, F., Thibault, J.-F. (2003). Pectins in the fruits of Japanese quince (*Chaenomeles japonica*). *Carbohydrate Polymers*, 53(4), 361–372. [https://doi.org/10.1016/S0144-8617\(03\)00118-8](https://doi.org/10.1016/S0144-8617(03)00118-8)
37. Seglina, D., Krasnova, I., Heidemane, G., Ruissa, S. (2009). Influence of drying technology on the quality of dried candied *Chaenomeles japonica* during storage. *Latvian Journal of Agronomy/Agronomija Vestis*, 12, 113–118.
38. Стрелец, В. Д., Филатова, А. А. (2011). Урожайность и качество плодов перспективных форм айвы низкой в условиях Московской области. *Плодородие*, 2(59), 44–45. [Strelets, V. D., Filatova, A. A. (2011). Fruit yield and quality of the promising forms of flowering quince (*Chaenomeles maulei*) in the Moscow region. *Plodородие*, 2(59), 44–45. (In Russian)]
39. Bieniasz, M., Dziedzic, E., Kaczmarczyk, E. (2017). The effect of storage and processing on vitamin C content in Japanese quince fruit. *Folia Horticulturae*, 29(1), 83–93. <https://doi.org/10.1515/fhort-2017-0009>
40. Urbanavičiūtė, I., Liaudanskas, M., Bobinas, Č., Šarkinas, A., Rezgienė, A., Viskelis, P. (2020). Japanese quince (*Chaenomeles japonica*) as a potential source of phenols: Optimization of the extraction parameters and assessment of antiradical and antimicrobial activities. *Foods*, 9(8), Article 1132. <https://doi.org/10.3390/foods9081132>
41. Zvikas, V., Urbanavičiūtė, I., Bernotienė, R., Kulakauskienė, D., Morkunaite, U., Balion, Z. et al. (2020). Investigation of phenolic composition and anticancer properties of ethanolic extracts of *Chaenomeles* species leaves. *Foods*, 10(1), Article 18. <https://doi.org/10.3390/foods10010018>
42. Федулова, Ю. А., Кукулина, А. Г., Кольцов, В. А. (2024). Характеристика сортов хеномелеса по содержанию в плодах биологически активных фенольных соединений. *Вестник Мичуринского государственного аграрного университета*, 2(77), 24–28. [Fedulova, Yu. A., Kuklina, A. G., Koltsov, V. A. (2024). Characteristics of *Chaenomeles* varieties according to the content of biologically active phenolic compounds in fruits. *The Bulletin of Michurinsk State Agrarian University*, 2(77), 24–28. (In Russian)]
43. Lewandowska, U., Szewczyk, K., Owczarek, K., Hrabec, Z., Podśędek, A., Koziółkiewicz, M. et al. (2013). Flavanols from Japanese quince (*Chaenomeles japonica*) fruit inhibit human prostate and breast cancer cell line invasiveness and cause favorable changes in *Bax/Bcl-2* mRNA ratio. *Nutrition and Cancer*, 65(2), 273–285. <https://doi.org/10.1080/01635581.2013.749292>
44. Gorlach, S., Wagner, W., Podśędek, A., Szewczyk, K., Koziółkiewicz, M., Daszych, J. (2011). Procyanidins from Japanese quince (*Chaenomeles japonica*) fruit induce apoptosis in human colon cancer Caco-2 cells in a degree of polymerization-dependent manner. *Nutrition and Cancer*, 63(8), 1348–1360. <https://doi.org/10.1080/01635581.2011.608480>
45. Owczarek, K., Hrabec, E., Fichna, J., Sosnowska, D., Koziółkiewicz, M., Szymański, J. et al. (2017). Flavanols from Japanese quince (*Chaenomeles japonica*) fruit suppress expression of cyclooxygenase-2, metalloproteinase-9, and nuclear factor-kappaB in human colon cancer cells. *Acta Biochimica Polonica*, 64(3), 567–576. <https://doi.org/10.18388/abp.2017.1599>
46. Ros, J. M., Laencina, J., Hellin, P., Jordan, M. J., Vila, R., Rumpunen, K. (2004). Characterization of juice in fruits of different *Chaenomeles* species. *LWT-Food Science and Technology*, 37(3), 301–307. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2003.09.005>
47. Hellin, P., Vila, R., Jordán, M. J., Laencina, J., Rumpunen, K., Ros, J. M. (2003). Characteristics and composition of *Chaenomeles* fruit juice. Chapter in a book: Japanese Quince — Potential Fruit Crop for Northern Europe. Alnarp: Swedish University of Agricultural Sciences, 2003.
48. Du, H., Wu, J., Li, H., Zhong, P.-X., Xu, Y.-J., Li, C.-H. et al. (2013). Polyphenols and triterpenes from *Chaenomeles* fruits: Chemical analysis and antioxidant activities assessment. *Food Chemistry*, 141(4), 4260–4268. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.06.109>
49. Lykholat, Y. V., Khromykh, N. O., Didur, O. O., Sklyar, T. V., Holubieva, T. A., Lykholat, T. Y. et al. (2021). GC-MS analysis of cuticular waxes and evaluation of antioxidant and antimicrobial activity of *Chaenomeles cathayensis* and *Ch. × californica* fruits. *Regulatory Mechanisms in Biosystems*, 12(4), 718–723. <https://doi.org/10.15421/022199>
50. Komar-Tyomnaya, L. D., Paly, A. E. (September, 16–18, 2015). *Strategy of Chaenomeles selection on the chemical composition of fruits*. Book of abstracts III Balkan Symposium on Fruit Growing, Belgrade, Serbia, 2015.
51. Byczkiewicz, S., Szwajgier, D., Cisowska, J. K., Szczepaniak, O., Szulc, P. (2021). Comparative examination of bioactive phytochemicals in quince (*Chaenomeles*)

- fruits and their *in vitro* antioxidant activity. *Emirates Journal of Food and Agriculture*, 33(4), 293–302. <https://doi.org/10.9755/ejfa.2021.v33.i4.2667>
52. Ponder, A., Hallmann, E. (2017). Comparative evaluation of the nutritional value and the content of bioactive compounds in the fruit of individual species of chaenomeles and quince. *World Scientific News*, 2(73), 101–108.
 53. Turkiewicz, I. P., Wojdyło, A., Tkacz, K., Nowicka, P., Golis, T., Bąbelski, P. (2020). ABTS On-line antioxidant, α -amylase, α -glucosidase, pancreatic lipase, acetyl- and butyrylcholinesterase inhibition activity of *Chaenomeles* fruits determined by polyphenols and other chemical compounds. *Antioxidants*, 9(1), Article 60. <https://doi.org/10.3390/antiox9010060>
 54. Strek, M., Gorlach, S., Podsedek, A., Sosnowska, D., Koziolkiewicz, M., Hrabec, Z. et al. (2007). Procyranidin oligomers from Japanese quince (*Chaenomeles japonica*) fruit inhibit activity of MMP-2 and MMP-9 metalloproteinases. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 55(16), 6447–6452. <https://doi.org/10.1021/jf070621c>
 55. Kikowska, M., Włodarczyk, A., Rewers, M., Sliwinska, E., Studzińska-Sroka, E., Witkowska-Banaszczak, E. et al. (2019). Micropropagation of *Chaenomeles japonica*: A step towards production of polyphenol-rich extracts showing anti-oxidant and antimicrobial activities. *Molecules*, 24(7), Article 1314. <https://doi.org/10.3390/molecules24071314>
 56. Teleszko, M., Wojdyło, A. (2015). Comparison of phenolic compounds and antioxidant potential between selected edible fruits and their leaves. *Journal of Functional Foods*, 14, 736–746. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2015.02.041>
 57. Chojnacka, K., Sosnowska, D., Polka, D., Owczarek, K., Gorlach-Lira, K., Oliveira De Verasa, B. et al. (2020). Comparison of phenolic compounds, antioxidant and cytotoxic activity of extracts prepared from Japanese quince (*Chaenomeles japonica* L.) leaves. *Journal of Physiology and Pharmacology*, 71(2), 213–222. <http://doi.org/10.26402/jpp.2020.2.05>
 58. Efenberger-Szmechtyk, M., Nowak, A., Czyżowska, A., Kucharska, A. Z., Fecka, I. (2020). Composition and antibacterial activity of *Aronia melanocarpa* (Michx.) Elliot, *Cornus mas* L. and *Chaenomeles superba* Lindl. leaf extracts. *Molecules*, 25(9), Article 2011. <https://doi.org/10.3390/molecules25092011>
 59. Didur, O. O., Khromykh, N. O., Drehlav, O. A., Sklyar, T. V., Dzhanan, V. M., Mazur, N. V. et al. (2024). Influence of silver nanoparticles synthesized from *Chaenomeles* leaf extracts on pathogenic microorganisms *Klebsiella pneumoniae*, *Staphylococcus aureus*, and *Fusarium culmorum*. *Biosystems Diversity*, 32(3), 380–388. <https://doi.org/10.15421/012441>
 60. Mierina, I., Serzanel, R., Strele, M., Moskaluka, J., Ivdr, E., Jure, M. (2013). Investigation of the oil and meal of Japanese quince (*Chaenomeles japonica*) seeds. *Proceedings of the Latvian Academy of Sciences. Section B*, 67(4/5)(685/686), 405–410. <https://doi.org/10.2478/prolas-2013-0071>
 61. Górna, P., Pugajeva, I., Segliņa, D. (2014). Seeds recovered from by-products of selected fruit processing as a rich source of tocopherols: RP-HPLC/FLD and RP-UPLC-ESI/MSⁿ study. *European Food Research and Technology*, 239(3), 519–524. <https://doi.org/10.1007/s00217-014-2247-3>
 62. Sipeniece, E., Mišina, I., Grygier, A., Qian, Y., Rudzińska, M., Kaufmane, E. et al. (2021). Impact of the harvest year of three cultivars of Japanese quince (*Chaenomeles japonica*) on the oil content and its composition. *Scientia Horticulturae*, 275, Article 109683. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109683>
 63. Turkiewicz, I. P., Wojdyło, A., Tkacz, K., Nowicka, P. (2021). Comprehensive characterization of *Chaenomeles* seeds as a potential source of nutritional and biologically active compounds. *Journal of Food Composition and Analysis*, 102, Article 104065. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2021.104065>
 64. Войткевич, С. А. (1994). 865 душистых веществ для парфюмерии и бытовой химии. Москва: Пищевая промышленность, 1994. [Voitkevich, S. A. (1994). 865 scented substances for perfumery and household chemicals. Moscow: Food industry, 1994. (In Russian)]
 65. Zhang, R., Li, Sh., Zhu, Zh., He, J. (2019). Recent advances in valorization of *Chaenomeles* fruit: A review of botanical profile, phytochemistry, advanced extraction technologies and bioactivities. *Trends in Food Science and Technology*, 91, 467–482. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.07.012>
 66. Wang, L., Liu, H.-M., Xie, A.-J., Wang, X.-D., Zhu, C.-Y., Qin, G.-Y. (2018). Chinese quince (*Chaenomeles sinensis*) seed gum: Structural characterization. *Food Hydrocolloids*, 75, 237–245. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2017.08.001>
 67. Turkiewicz, I. P., Wojdyło, A., Tkacz, K., Lech, K., Michalska-Ciechanowska, A., Nowicka, P. (2020). The influence of different carrier agents and drying techniques on physical and chemical characterization of Japanese quince (*Chaenomeles japonica*) microencapsulation powder. *Food Chemistry*, 323, Article 126830. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.126830>
 68. Turkiewicz, I. P., Tkacz, K., Nowicka, P., Michalska-Ciechanowska, A., Lech, K., Wojdyło, A. (2021). Physicochemical characterization and biological potential of Japanese quince polyphenol extract treated by different drying techniques. *LWT*, 152, Article 112247. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112247>
 69. Ben-Othman, S., Bleive, U., Kaldmäe, H., Aluvee, A., Rätsep, R., Karp, K. et al. (2023). Phytochemical characterization of oil and protein fractions isolated from Japanese quince (*Chaenomeles japonica*) wine by-product. *LWT*, 178, Article 114632. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.114632>
 70. Hendrich, A. B., Strugała, P., Dudra, A., Kucharska, A. Z., Sokół-Łętowska, A., Wojnicki, D. et al. (2020). Microbiological, antioxidant and lipoxigenase-1 inhibitory activities of fruit extracts of chosen Rosaceae family species. *Advances in Clinical and Experimental Medicine*, 29(2), 215–224. <https://doi.org/10.17219/acem/115086>
 71. Urbanavičiūtė, I., Viškelis, P. (2022) Biochemical composition of Japanese quince (*Chaenomeles japonica*) and its promising value for food, cosmetic, and pharmaceutical industries. Chapter in a book: Fruit Industry. IntechOpen, 2022. <https://doi.org/10.5772/intechopen.102361>
 72. Urbanavičiūtė, I., Rubinskiene, M., Viškelis, P. (2019). The fatty acid composition and quality of oils from post-industrial waste of quince *Chaenomeles japonica*. *Chemistry and Biodiversity*, 16(9), Article e1900352. <https://doi.org/10.1002/cbdv.201900352>
 73. Mierina, I., Serzane, R., Strele, M., Moskaluka, Ju., Segliņa, D., Jure, M. (May 5–6, 2011). *Extracts of Japanese quince seeds-potential source of antioxidants*. 6th Conference Proceedings of 6th Baltic Conference on Food Science and Technology: Innovations for Food Science and Production (FOODBALT-2011). Jelgava, Latvia, 2011.
 74. Górnaś, P., Siger, A., Juhnėviča, K., Lācis, G., Sņe, E., Segliņa, D. (2014). Cold-pressed Japanese quince (*Chaenomeles japonica* (Thunb.) Lindl. ex Spach) seed oil as a rich source of α -tocopherol, carotenoids and phenolics: A comparison of the composition and antioxidant activity with nine other plant oils. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 116(5), 563–570. <https://doi.org/10.1002/ejlt.201300425>
 75. McCusker, M. M., Grant-Kels MD, J. M. (2010). Healing fats of the skin: The structural and immunologic roles of the ω -6 and ω -3 fatty acids. *Clinics in Dermatology*, 28(4), 440–451. <https://doi.org/10.1016/j.clindermatol.2010.03.020>
 76. Górnaś, P., Siger, A., Rudzińska, M., Grygier, A., Marszałkiewicz, S., Ying, Q., et al. (2019). Impact of the extraction technique and genotype on the oil yield and composition of lipophilic compounds in the oil recovered from Japanese quince (*Chaenomeles japonica*) seeds. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 121(1), Article 1800262. <https://doi.org/10.1002/ejlt.201800262>
 77. Ghafourian, M., Tamri, P., Hemmati, A. (2015). Enhancement of human skin fibroblasts proliferation as a result of treating with quince seed mucilage. *Jundishapur Journal of Natural Pharmaceutical Products*, 10(1), Article e18820. <https://doi.org/10.17795/jjnpp-18820>
 78. Kawahara, T., Tsutsui, K., Nakanishi, E., Inoue, T., Hamauzu, Y. (2017). Effect of the topical application of an ethanol extract of quince seeds on the development of atopic dermatitis-like symptoms in NC/Nga mice. *BMC Complementary and Alternative Medicine*, 17(1), Article 80. <https://doi.org/10.1186/s12906-017-1606-6>
 79. Kirtil, E., Oztop, M. H. (2016). Characterization of emulsion stabilization properties of quince seed extract as a new source of hydrocolloid. *Food Research International*, 85, 84–94. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2016.04.019>
 80. Itoh, S., Yamaguchi, M., Shigeyama, K., Sakaguchi, I. (2019). The anti-aging potential of extracts from *Chaenomeles sinensis*. *Cosmetics*, 6(1), Article 21. <https://doi.org/10.3390/cosmetics6010021>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ	AUTHOR INFORMATION
Принадлежность к организации	Affiliation
Раева-Богословская Екатерина Николаевна — научный сотрудник, Лаборатория биотехнологии растений, Главный ботанический сад им. Н. В. Цицина РАН 127276, Россия, г. Москва, ул. Ботаническая, 4 E-mail: katyaraeva@rambler.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1540-656X * автор для контактов	Ekaterina N. Raeva-Bogoslovskaya , Researcher, Laboratory of Plant Biotechnology, Tsitsin Main Botanical Garden of the Russian Academy of Sciences 4, Botanicheskaya str., Moscow, 127276, Russia E-mail: katyaraeva@rambler.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1540-656X * corresponding author
Молканова Ольга Ивановна — кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник, заведующий Лабораторией биотехнологии растений, Главный ботанический сад им. Н. В. Цицина РАН 127276, Россия, г. Москва, ул. Ботаническая, 4 E-mail: molkanova@mail.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4664-7809	Olga I. Molkanova , Candidate of Technical Sciences, Leading Researcher, Head of the Laboratory of Plant Biotechnology, Tsitsin Main Botanical Garden of the Russian Academy of Sciences 4, Botanicheskaya str., Moscow, 127276, Russia E-mail: molkanova@mail.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4664-7809
Крахмалева Ирина Леонидовна — научный сотрудник Лаборатории биотехнологии растений, Главный ботанический сад им. Н. В. Цицина РАН 127276, Россия, г. Москва, ул. Ботаническая, 4 E-mail: seg glory@bk.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0409-6989	Irina L. Krakhmaleva , Researcher, Laboratory of Plant Biotechnology, Tsitsin Main Botanical Garden of the Russian Academy of Sciences 4, Botanicheskaya str., Moscow, 127276, Russia E-mail: seg glory@bk.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0409-6989
Кузнецова Оксана Александровна — доктор технических наук, директор, Федеральный научный центр пищевых систем им. В. М. Горбатова 109316, Москва, ул. Талалихина, 26 E-mail: o.kuznecova@fnpcs.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7474-485X	Oksana A. Kuznecova , Doctor of Technical Sciences, Director, V. M. Gorbato Federal Research Center for Food Systems 26, Talalikhin str., 109316, Moscow, Russia E-mail: o.kuznecova@fnpcs.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7474-485X

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ	AUTHOR INFORMATION
Принадлежность к организации	Affiliation
<p>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 109316, Москва, ул. Талалихина, 26 E-mail: d.utyantov@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7693-3032</p>	<p>Dmitry A. Utyanov, Candidate of Technical Sciences, Researcher, Laboratory of Scientific and Methodical Work, Biological and Analytical Research, V. M. Gorbatov Federal Research Center for Food Systems 26, Talalikhin str., 109316, Moscow, Russia E-mail: d.utyantov@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7693-3032</p>
<p>Митрофанова Ирина Вячеславовна — член-корреспондент РАН, доктор биологических наук, главный научный сотрудник, заведующий научно-исследовательским отделом экспериментальной биологии и патологии растений, Главный ботанический сад им. Н. В. Цицина РАН 127276, Россия, г. Москва, ул. Ботаническая, 4 E-mail: irimitrofanova@yandex.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4650-6942</p>	<p>Irina V. Mitrofanova, Corresponded Member of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Biological Sciences, Chief Researcher, Head of Plant Experimental Biology and Pathology Department, Tsitsin Main Botanical Garden of the Russian Academy of Sciences 4, Botanicheskaya str., Moscow, 127276, Russia E-mail: irimitrofanova@yandex.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4650-6942</p>
Критерии авторства	Contribution
<p>Авторы в равных долях имеют отношение к написанию рукописи и одинаково несут ответственность за плагиат.</p>	<p>The author has the sole responsibility for writing the manuscript and is responsible for plagiarism.</p>
Конфликт интересов	Conflict of interest
<p>Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.</p>	<p>The authors declare no conflict of interest.</p>

DOI: <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-4-541-554>

Поступила 13.10.2025

Поступила после рецензирования 24.11.2025

Принята в печать 27.11.2025

© Беленко А. А., Путилов В. Э., Непомнящий А. П., Причепа А. О.,

Семенова А. А., Ситнов В. Ю., Сорокина Н. П., 2025

<https://www.fsjour.com/jour>

Обзорная статья

Открытый доступ

ОСНОВНЫЕ СТРАТЕГИИ СИНТЕЗА МОЛОЧНОЙ КИСЛОТЫ У КЛЮЧЕВЫХ ВИДОВ *LACTOBACILLACEAE*: ФИЛОГЕНЕТИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ, МЕТАБОЛИЧЕСКИЕ ПУТИ И ГЕНЕТИЧЕСКАЯ РЕГУЛЯЦИЯ

Беленко А. А.*, Путилов В. Э., Непомнящий А. П., Причепа А. О.*,
Семенова А. А., Ситнов В. Ю., Сорокина Н. П.

Федеральный научный центр пищевых систем им. В. М. Горбатова, Санкт-Петербург — Москва — Углич, Россия

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: АННОТАЦИЯ

Lactobacillaceae,
молочная кислота,
метаболический путь,
филогенетическая
адаптация,
лактатдегидрогеназа,
лактатрацемазы,
субстратная
специфичность

Молочнокислые бактерии семейства *Lactobacillaceae* играют ключевую роль в пищевой, химической, сельскохозяйственной, а также косметической и фармацевтической промышленности как основной продуцент молочной кислоты. Особый успех наработки молочной кислоты достигается за счет внедрения методов генетической инженерии и прецизионной ферментации, направленных на контроль синтеза отдельных оптически чистых L/D-изомеров и утилизации определенных компонентов сахаросодержащих субстратов питательных сред. В то же время бактерии *Lactobacillaceae* обладают рядом естественных эволюционных преимуществ, обеспечивающих успех их промышленного применения, включая высокую кислотоустойчивость, продуктивность и безопасность. В качестве наиболее перспективных штаммов-продуцентов молочной кислоты в естественных условиях можно выделить *Lactobacillus delbrueckii*, *L. amylovorus*, *L. acidophilus*, *Lacticaseibacillus casei*, *L. paracasei*, *Lactiplantibacillus plantarum* и некоторые другие. Продуктивность штаммов во многом зависит от их способности ферментировать специфические субстраты, в первую очередь различные источники углеводов. Особый научный и практический интерес представляет использование отходов пищевой, сельскохозяйственной, лесозаготовительной промышленности в качестве субстратов для крупномасштабного производства молочной кислоты. Такой подход позволяет значительно снизить затраты на сложносоставные питательные среды и удешевить производство. Понимание основных стратегий утилизации субстрата различными представителями *Lactobacillaceae* позволит более предметно подойти к выбору штамма. В данном обзоре основное внимание уделено ключевым особенностям ферментации штаммов *L. casei*, *L. delbrueckii*, *L. plantarum*, *L. acidophilus* с учетом их филогенетических характеристик и метаболических особенностей. В работе рассмотрены центральные механизмы утилизации углеводов, субстрат-специфичная активация альтернативных путей метаболизма, а также ключевые гены и их паттерны, ассоциированные с синтезом молочной кислоты. Рассмотрены метаболические пути Эмбдена-Мейергофа-Парнаса, пентозофосфатный и фосфокетотазный, механизм углеродной катаболической репрессии и роль пути Лелуара. Продемонстрирована роль ключевых ферментов-участников процесса утилизации субстрата и образовании молочной кислоты, включая лактатдегидрогеназу, лактатрацемазу, альдолазу, цитратлиазу и других.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Исследование выполнено при поддержке национального проекта по обеспечению технологического лидерства «Новые материалы и химия», тема FGUS-2025-0006.

Received 13.10.2025

Accepted in revised 24.11.2025

Accepted for publication 27.11.2025

© Belenko A. A., Putilov V. E., Nepomnyashiy A. P., Prichupa A. O.,

Semenova A. A., Sitnov V. Yu., Sorokina N. P., 2025

Available online at <https://www.fsjour.com/jour>

Review article

Open access

CORE STRATEGIES OF LACTIC ACID BIOSYNTHESIS IN KEY *LACTOBACILLACEAE* SPECIES: PHYLOGENETIC PATTERNS, METABOLIC PATHWAYS, AND GENETIC REGULATION

Andrey A. Belenko*, Vladislav E. Putilov, Anatoliy P. Nepomnyashiy, Artem O. Prichupa*,
Anastasia A. Semenova, Veniamin Yu. Sitnov, Ninel P. Sorokina

V. M. Gorbato Federal Research Center for Food Systems, Saint Petersburg — Moscow — Uglich, Russia

KEYWORDS:

Lactobacillaceae,
lactic acid, metabolic
pathway, phylogenetic
adaptation, lactate
dehydrogenase, lactate
racemase, substrate
specificity

ABSTRACT

Lactic acid bacteria of the *Lactobacillaceae* family play a key role in the food, chemical, agricultural, cosmetic and pharmaceutical industries as the main producer of lactic acid. The main success in production of lactic acid is achieved due to introduction of genetic engineering methods and precision fermentation aimed at the control of synthesis of individual optically clean L/D-isomers and utilization of certain components of sugar-containing substrates of nutrient media. At the same time, bacteria *Lactobacillaceae* have several natural evolutionary advantages that ensure success of their industrial use, including high acid resistance, productivity and safety. *Lactobacillus delbrueckii*, *L. amylovorus*, *L. acidophilus*, *Lacticaseibacillus casei*, *L. paracasei*, *Lactiplantibacillus plantarum* and some others can be mentioned as the most promising strains — producers of lactic acid in natural conditions. Productivity of strains to a large extent depends on their ability to ferment specific substrates, first of all, different carbohydrate sources. The use of wastes of the food, agricultural and timber industries as substrates for large-scale production of lactic acid is of particular scientific and practical interest. This approach makes it possible to significantly reduce expenses on complex nutrient media and cut production costs. The understanding of the main strategies of substrate

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Беленко, А. А., Путилов, В. Э., Непомнящий, А. П., Причепа, А. О., Ситнов, В. Ю., Семенова, А. А. и др. (2025). Основные стратегии синтеза молочной кислоты у ключевых видов *Lactobacillaceae*: филогенетические закономерности, метаболические пути и генетическая регуляция. *Пищевые системы*, 8(4), 541–554. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-4-541-554>

FOR CITATION: Belenko, A. A., Putilov, V. E., Nepomnyashchii, A. P., Prichupa, A. O., Sitnov, V. Yu., Semenova, A. A. et al. (2025). Core strategies of lactic acid biosynthesis in key *Lactobacillaceae* species: Phylogenetic patterns, metabolic pathways, and genetic regulation. *Food Systems*, 8(4), 541–554. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-4-541-554>

utilization by various representatives of *Lactobacillaceae* allows for a more specific choice of a strain. In this review, the main attention is given to the key peculiarities of fermentation of *L. casei*, *L. delbrueckii*, *L. plantarum*, and *L. acidophilus* strains with account for their phylogenetic characteristics and metabolic features. The paper examines the central mechanisms of the utilization of carbohydrates, substrate-specific activation of alternative pathways of metabolism, as well as key genes and their patterns associated with lactic acid synthesis. The authors describe the Embden–Meyerhof–Parnas metabolic pathway, pentose phosphate and phosphoketolase pathways, mechanism of carbon catabolite repression and the role of the Leloir pathway. The role of the key enzymes participating in the process of substrate utilization and formation of lactic acid, including lactate dehydrogenase, lactate racemase, aldolase, citrate lyase and others, is demonstrated.

FUNDING: The research was performed with the support of the national project on the assurance of technological leadership “New materials and chemistry”, theme FGUS-2025-0006.

1. Введение

Семейство молочнокислых бактерий (МКБ) *Lactobacillaceae* представляет собой гетерогенную группу грамположительных, неспорообразующих микроорганизмов, относящихся к факультативным анаэробам или микроаэрофилам. Они способны продуцировать органические кислоты, включая молочную кислоту (МК), а также антимикробные вещества, такие как бактериоцины [1–3]. МК является одним из важнейших биологических продуктов метаболической ферментации МКБ и может существовать в форме D-МК и L-МК в соответствии с ее оптическим вращением. Синтез МК в процессе ферментации связан с ферментативным гидролизом глюкозы, хотя некоторые штаммы могут метаболизировать и другие гексозы, а также пентозы. В зависимости от типа метаболизма МКБ делятся на две филогенетические клады: гомоферментативные и гетероферментативные. В случае гомоферментативного молочнокислого брожения продуктом метаболизма субстрата является в основном МК. Для гетероферментативных штаммов, помимо лактата, характерно накопление побочных продуктов брожения, таких как ацетат, этанол, формиат, ацетоин, а также фумаровая и уксусная кислоты, и некоторых других [4].

2. Объекты и методы

Для подготовки настоящего обзора был осуществлен целевой систематический поиск научных публикаций в релевантных научных базах данных, включая Scopus, Web of Science, PubMed, Google Scholar и Российский индекс научного цитирования (РИНЦ). В качестве комбинации ключевых слов и терминов для поиска информации использовали названия рассматриваемых видов семейства *Lactobacillaceae*, термины «молочная кислота», «биосинтез», «ферментация», «утилизация субстратов», «метаболические пути», а также их англоязычные эквиваленты, с акцентом на конкретные виды бактерий и названия ключевых ферментов. В обзор были включены наиболее релевантные оригинальные исследования и обзоры за последние 15–25 лет, в отдельных случаях учитывались и более ранние работы, обладающие фундаментальной значимостью. Критериями включения публикаций в обзор являлись их непосредственная связь с заявленной темой, печать в рецензируемых журналах, наличие данных, раскрывающих базовые механизмы метаболизма молочнокислых бактерий, стратегии их адаптации к выживанию и синтезу ключевых продуктов метаболизма, включая молочную кислоту. Для исключения избыточной и нерелевантной информации из поиска были удалены статьи, сфокусированные на клинических аспектах, углубленном анализе пробиотических свойств, не связанных напрямую с продуктивностью. Также не рассматривались исследования, посвященные другим продуктам метаболизма, не имеющие прямого отношения к промышленному биосинтезу молочной кислоты и метаболизму углеводов в целом.

Настоящая работа посвящена комплексному анализу биохимических механизмов синтеза молочной кислоты, генетической регуляции данного процесса, а также филогенетического разнообразия, распространения и прикладного значения молочнокислых бактерий.

3. Ключевая дихотомия МКБ и метаболизм углеводов

Ключевым критерием, лежащим в основе деления МКБ на гомоферментативные и гетероферментативные, является тип метаболизма, определяемый спецификой ферментативных путей и набором конечных продуктов брожения [5].

3.1. Гомоферментативное молочнокислое брожение

Гомоферментативные МКБ характеризуются преимущественным (более 85–90% от общего количества продуктов брожения) образованием МК в результате молочнокислого брожения. Этот процесс представляет собой прямое и полное расщепление гексоз (реже — пентоз) с образованием двух молекул МК на одну молекулу глюкозы, без выделения газообразных продуктов [6]. К типичным представителям

этой группы относятся роды *Lactococcus* (например, *Lactococcus lactis*) и *Lactobacillus* (в том числе *L. delbrueckii* и *L. acidophilus*), которые широко используются в молочной промышленности. Гомоферментативные бактерии обладают ферментами классического гликолитического пути Эмбдена–Мейергофа–Парнаса (ЭМП), что обеспечивает эффективное преобразование сахаров в МК [7]. Данный тип гликолиза является основным механизмом расщепления глюкозы до пирувата в анаэробных условиях с образованием АТФ и НАДН.

Пируват является ключевым промежуточным продуктом в метаболизме многих МКБ и может превращаться в различные конечные продукты, включая муравьиную и уксусную кислоты, ацетальдегид, этанол, ацетоин, диацетил и бутан-2,3-диол, в том числе МК. Ключевым этапом пути ЭМП является реакция, катализируемая альдолазой: фермент расщепляет фруктозо-1,6-бисфосфат на две триозофосфатные молекулы — глицеральдегид-3-фосфат и дигидроксиацетонфосфат, которые в дальнейшем превращаются в пируват. На финальной стадии происходит восстановление пирувата до МК с участием фермента лактатдегидрогеназы в присутствии НАДН в качестве кофактора. При этом НАДН окисляется обратно до НАД⁺, обеспечивая непрерывность гликолитического цикла. В итоге на одну молекулу глюкозы образуется две молекулы пирувата, две молекулы АТФ (чистый выход) и две молекулы НАДН [8]. Этот процесс позволяет бактериям эффективно получать энергию в анаэробных условиях, а также поддерживать баланс восстановительных эквивалентов [9]. Благодаря работе альдолазы и высокой специфичности метаболизма гомоферментативные МКБ преобразуют глюкозу практически исключительно в МК [10,11].

3.2. Гетероферментативное молочнокислое брожение

Для гетероферментативных штаммов *Lactobacillaceae* характерен альтернативный или нетипичный путь расщепления углеводов [12]. Метаболизм углеводов может осуществляться по пути фосфоглюконатного и преимущественно фосфокетолазного преобразования с образованием МК и других метаболитов, в том числе уксусной кислоты, ацетата или этанола и CO₂ [4,13]. Образование ацетата происходит при наличии в питательной среде фруктозы и поддержании окислительно-восстановительного баланса за счет маннита [14]. К данной группе относятся многие представители родов *Leuconostoc*, *Pediococcus*, а также некоторые штаммы *Lactocaseibacillus*. Поскольку бактерии не обладают полным набором ферментов гликолиза, активность ферментов вспомогательных путей расщепления пентоз и гексоз обеспечивает им дополнительную метаболическую гибкость и позволяет адаптироваться к различным условиям среды [15,16].

3.3. Пентозофосфатный путь утилизации углеводов

Пентозофосфатный путь (ПФП) у МКБ представляет собой альтернативный метаболический путь расщепления углеводов, который функционирует наряду с гликолитическим. Этот путь включает два основных этапа: окислительный и неокислительный [17]. На первом этапе осуществляется преобразование глюкозо-6-фосфата в диоксид углерода, рибулозо-5-фосфат и НАДФН [18]. В отличие от гликолиза, пентозофосфатный путь особенно важен в клетках с высокой потребностью в НАДФН. В результате окислительного этапа из одной молекулы глюкозо-6-фосфата формируются две молекулы НАДФН и одна молекула рибулозо-5-фосфата. Это обеспечивает клетку восстановительной энергией и предшественниками для синтеза нуклеотидов [19].

Второй (неокислительный) этап включает серию изомеризаций и переносов углеродных фрагментов, катализируемых ферментами фосфопентозоизомеразой, фосфопентозоэпимеразой, транскетолазой и трансальдолазой. На этом этапе рибулозо-5-фосфат превращается в рибозо-5-фосфат и ксилулозо-5-фосфат, которые затем подвергаются взаимопревращениям, приводящим к образованию фруктозо-6-фосфата и глицеральдегид-3-фосфата. Последний преобразуется в пируват и далее в МК при участии лактатдегидрогена-

зы по пути гликолиза, аналогично гомоферментативным штаммам. При этом стереоспецифичность фермента определяет конфигурацию МК. D-МК и L-МК катализируются ферментами D-лактатдегидрогеназой и L-лактатдегидрогеназой соответственно, накопление которых зависит от уровней экспрессии соответствующих генов в штамме [20]. Таким образом, пентозофосфатный путь обеспечивает бактериям энергетическую гибкость в зависимости от потребностей клетки, условий культивирования и стадии роста [18,21].

3.4. Фосфокетолазный путь утилизации углеводов

Основным ферментом фосфокетолазного пути (ФКП) является фосфокетотлаза, катализирующая расщепление пентозофосфата на два ключевых продукта — ацетилфосфат (C2-фрагмент) и глицеральдегид-3-фосфат (C3-фрагмент). Глицеральдегид-3-фосфат далее подвергается ферментативным превращениям, аналогичным гликолитическому пути, с образованием пирувата, который восстанавли-

вается до МК посредством лактатдегидрогеназы. Часть углеродного скелета направляется на образование МК с регенерацией NAD^+ , необходимого для поддержания гликолитического цикла [22].

Преобразование ацетилфосфата может идти по пути восстановления до этанола через стадию ацетальдегида, либо по пути окисления до уксусной кислоты с сопутствующим синтезом одной молекулы АТФ. Преобладание того или иного варианта, как и в случае ПФП, зависит от вида и стадии роста бактерий, а также от условий культивирования [23]. Этот путь является отличительной чертой гетероферментативных МКБ и определяет их уникальный метаболизм и продукцию конечных метаболитов.

Таким образом, классификация МКБ по типу метаболизма отражает их биохимические особенности и определяет спектр продуктов брожения. В общем виде схемы образования МК в результате метаболизма углеводов гомо- и гетероферментативными штаммами МКБ представлены на Рисунке 1 и Рисунке 2.

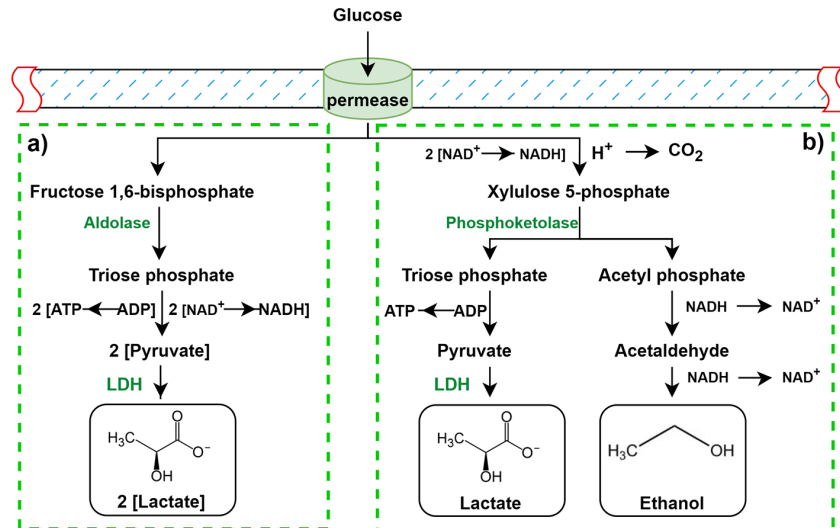


Рисунок 1. Образование МК в результате метаболизма углеводов гомо- и гетероферментативными штаммами МКБ: а) гомоферментативный метаболизм гексоз через путь ЭМП; б) гетероферментативный метаболизм гексоз через путь фосфокетотлазы. LDH — лактатдегидрогеназа

Figure 1. Formation of lactic acid as a result of carbohydrate metabolism by homo- and heterofermentative strains of lactic acid bacteria (LAB): a) homofermentative metabolism of hexoses through the EMP pathway; b) heterofermentative metabolism of hexoses through the phosphoketolase pathway. LDH — lactate dehydrogenase

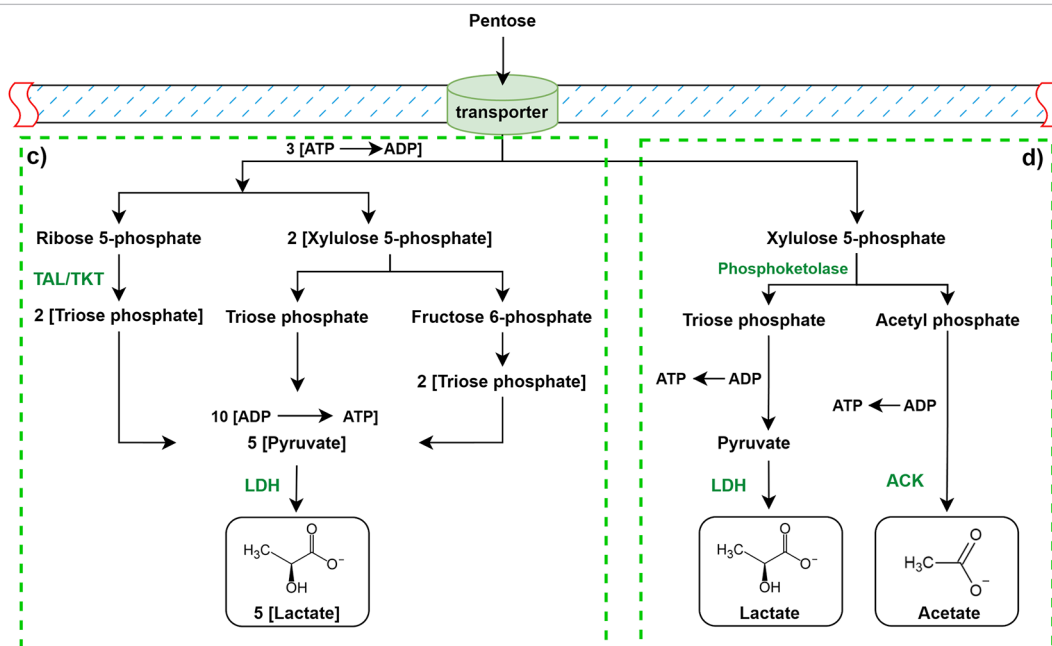


Рисунок 2. Образование МК в результате метаболизма углеводов гомо- и гетероферментативными штаммами МКБ. с) гомоферментативный метаболизм пентоз через пентозофосфатный путь, d) гетероферментативный метаболизм пентоз через путь фосфокетотлазы. LDH — лактатдегидрогеназа; ACK — ацетаткиназа; TAL — трансальдозаза; TKT — транскетотлаза

Figure 2. Formation of lactic acid as a result of carbohydrate metabolism by homo- and heterofermentative strains of LAB: c) homofermentative metabolism of pentoses through the pentose phosphate pathway, d) heterofermentative metabolism of pentoses through the phosphoketolase pathway. LDH — lactate dehydrogenase; ACK — acetate kinase; TAL — transaldolase; TKT — transketolase

3.5. Метаболический путь Лелуара

В то время как глюкоза легко вступает в гликолиз, дальнейший метаболизм галактозы может быть менее эффективным. В случае, когда галактоза поглощается пермеазой, ее метаболизм протекает по пути Лелуара. Путь Лелуара представляет собой специфический метаболический маршрут, используемый бактериями, включая некоторые виды семейства *Lactobacillaceae*, для расщепления лактозы/галактозы в процессе брожения [24].

Механизм пути Лелуара начинается с фосфорилирования галактозы до галактозо-1-фосфата под действием фермента галактокиназы. На следующем этапе галактозо-1-фосфат взаимодействует с УДФ-глюкозой (UDP-глюкоза) с образованием УДФ-галактозы и глюкозо-1-фосфата. УДФ-галактоза затем изомеризуется в УДФ-глюкозу ферментом УДФ-галактозо-4-эпимеразой, что замыкает цикл и обеспечивает непрерывность процесса. Глюкозо-1-фосфат преобразуется в глюкозо-6-фосфат, который далее включается в классический гликолитический путь ЭМП для получения энергии и синтеза МК [25].

Для МКБ путь Лелуара обеспечивает возможность эффективно использовать лактозу/галактозу, что особенно важно при ферментации молочных продуктов, где лактоза является основным углеводом. Наличие данного пути позволяет бактериям адаптироваться к условиям среды и обеспечивает стабильность и эффективность молочнокислого брожения [26,27]. В общем виде метаболический путь Лелуара представлен на Рисунке 3.

3.6. Катаболитная репрессия

Другим важным механизмом регуляции метаболизма у МКБ является катаболитная репрессия (CCR — carbon catabolite repression). Этот механизм обеспечивает приоритетное использование наиболее энергоэффективных субстратов при молочнокислом брожении. В условиях, когда в среде присутствует глюкоза, происходит снижение внутриклеточной концентрации циклического аденозинмонофосфата (цАМФ). Это приводит к инактивации белкового активатора катаболизма, ответственного за стимуляцию транскрипции генов, участвующих в расщеплении других сахаров. В результате транскрипция этих генов подавляется, и бактерии концентрируются на быстрым и эффективным метаболизме глюкозы [28].

В контексте молочнокислого брожения CCR обеспечивает оптимизацию энергетического обмена, позволяя МКБ максимально эффективно использовать доступные углеводы для синтеза МК. При этом гомо- и гетероферментативные МКБ при наличии глюкозы в среде демонстрируют подавление путей, связанных с метаболизмом пентоз и других сахаров, что влияет на профиль конечных продуктов брожения [28]. В конечном итоге, механизм катаболитной репрессии позволяет бактериям быстрее адаптироваться к изменяющимся условиям среды, повышая их конкурентоспособность и эффективность ферментации. Это имеет важное значение для биотехнологических процессов и производства кисломолочных продуктов.

4. Метаболизм и субстратная специфичность

Способность к переключению метаболических путей — сложный физиологический процесс, обусловленный изменением доступности и состава углеводных субстратов в окружающей среде, а также регуляторными механизмами, обеспечивающими оптимальное использование энергетических ресурсов.

Основным субстратом для гомоферментативных МКБ являются моносахариды, в частности глюкоза, фруктоза и галактоза, которые легко транспортируются в клетку и быстро включаются в гликолитический путь. Способность к ферментации других углеводов, таких как пентозы или дисахариды, у гомоферментативных штаммов выражена значительно слабее или отсутствует, что обусловлено активностью соответствующих ферментов [29]. Высокая субстратная специфичность гомоферментативных МКБ обеспечивает эффективное преобразование субстрата с максимальным выходом МК и мини-

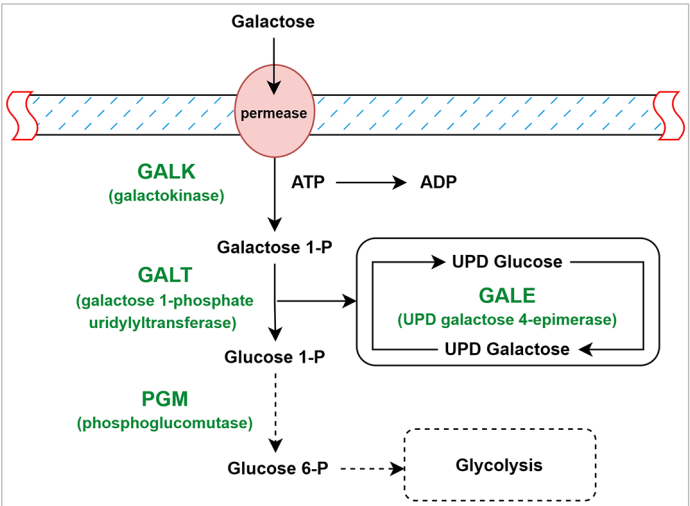


Рисунок 3. Метаболический путь углеводов Лелуара
Figure 3. Leloir metabolic pathway of carbohydrates

мальным образованием побочных продуктов [30,31]. Гетероферментативные МКБ обладают более разнообразным метаболическим потенциалом. Они используют как гликолитический путь, так и альтернативные реакции, и способны утилизировать широкий спектр моно- и дисахаридов, включая глюкозу, фруктозу и пентозы [32]. На переключение субстрата также существенно влияет pH среды. Определенные значения кислотности и наличие кислорода могут модифицировать метаболические пути и профиль продуктов брожения [33]. Эта метаболическая пластичность позволяет гетероферментативным представителям МКБ лучше адаптироваться к изменениям в составе среды и обеспечивает образование более широкого спектра биохимических продуктов [34]. Информация о метаболических особенностях и выходе МК на примере штаммов *L. casei*, *L. delbrueckii*, *L. acidophilus*, а также *Levilactobacillus brevis* представлена в Таблице 1.

Многие представители семейства *Lactobacillaceae* демонстрируют метаболическую гибкость. Выбор конкретного пути и накопление конечных продуктов метаболизма зависит как от штамма, так и от метаболизмуемого субстрата, а также от условий ферментации (pH, температура). Понимание механизмов утилизации специфического субстрата питательной среды отдельными штаммами позволит эффективнее использовать их в биотехнологических процессах, включая получение МК. Кроме того, это позволит подобрать отходы производства для снижения себестоимости процесса получения МК, что в целом повысит экономическую рентабельность синтеза целевых биопродуктов.

5. Филогенетические клады и метаболическая адаптация

Филогенетический анализ МКБ является нетривиальной задачей. Термин «молочнокислые бактерии» отражает ключевую особенность их метаболизма — способность сбраживать сахара с преимущественным образованием МК. Из этого определения следует, что данное наименование является скорее биологическим, нежели таксономическим [35]. Одним из самых известных родов МКБ является *Lactobacillus*, который относится к типу *Firmicutes* [16]. При этом род *Bifidobacterium*, попадающий под определение МКБ, относится к типу *Actinobacteria* [36]. В результате возникает проблема четкого определения и выделения «особого вида» МКБ как единой группы. Внутреннее разнообразие МКБ настолько велико, что объединение их под единым термином приобретает скорее функциональный, чем филогенетический характер. При этом множество МКБ сосуществуют совместно, в одном экологическом пространстве. Таким

Таблица 1. Особенности метаболической утилизации субстрата некоторых представителей семейства *Lactobacillaceae*
Table 1. Peculiarities of metabolic utilization of the substrate among several representatives of the *Lactobacillaceae* family

Вид	<i>L. acidophilus</i>	<i>L. delbrueckii</i>	<i>L. casei</i>	<i>L. brevis</i>	Ссылка
Филогенетическая клада	гомоферментативные		гетероферментативные		[30]
Метаболический путь	гликолиз (ЭМП)		фосфокетотазный/пентозофосфатный		[31]
Субстратная специфичность	гексозы (глюкоза, галактоза)		гексозы, пентозы, органические кислоты		[30,31,32]
Выход МК	1,8–2,0 моль/моль глюкозы		0,8–1,0 моль/моль глюкозы		[33]
Энергетический выход	2 АТФ/глюкоза		1 АТФ/глюкоза		[33]
Ферменты-маркеры	лактатдегидрогеназа, альдолаза		фосфокетоталаза		[29]
Основной продукт	МК (> 90%)		МК + этанол/уксусная кислота + CO ₂		[33,34]

примером являются бактерии рода *Lactobacillus* и *Bifidobacterium*, популяции которых были выявлены в зобике *Apis mellifera* (пчела медоносная) [37]. Другим примером являются представители рода *Lactobacillus*, *Fructobacillus* sp. и *Weissella cibaria*, которые были обнаружены в инфрабуккальном кармане муравьев [38]. МКБ также распространены среди водных животных, таких как рыбы, крабы и осьминоги [39]. При таком разнообразии и широком распространении МКБ вопрос их систематики и таксономии продолжает оставаться актуальным [40].

Исторически основное различие в таксономии между представителями *Lactobacillaceae* заключалось в их физиологической характеристике. По данным Национального института исследований генома человека (NHGRI), ситуация изменилась после 2008 года благодаря внедрению методов секвенирования нового поколения [41]. Анализ гена 16S рНК в сочетании с анализом профиля ферментации углеводов позволил выделить несколько групп: гомоферментативные, факультативно гетероферментативные и облигатно гетероферментативные [42]. На основе анализа геномных последовательностей большой совокупности представителей *Lactobacillus* и связанных родов был выделен род *Lactobacillus sensu lato*, в который вошли представители рода *Pediococcus* (семейство *Lactobacillaceae*) и представители родов *Convivina*, *Fructobacillus*, *Leuconostoc*, *Weissella* и *Oenococcus* (семейство *Leuconostocaceae*) [16,43,44].

Учитывая широкое разнообразие представителей *Lactobacillaceae* и трудности в таксономической идентификации штаммов, была усилена доказательная база. В качестве оценочных метрик были добавлены следующие показатели: средняя идентичность нуклеотидов (ANI) и аминокислот (AAI), процент консервативных белков (POCP), анализ филогенетических сетей на основе дополнительных рибосомальных белков и филогенетических маркеров [43,45,46]. На основании анализа аминокислотных последовательностей 29 рибосомальных белков и 12 филогенетических маркеров было выявлено два кластера филогенетических групп: кластер I включает шесть филогрупп, а кластер II — четыре филогруппы. В кластер I были отнесены следующие группы: (1) *L. delbrueckii*, (2) *L. alimentarius*, (3) *L. perolens*, (4) *L. casei*, (5) *L. sakei*, (6) *L. coryniformis*. В кластер II вошли: (1) *L. salivarius*, (2) *L. reuteri*, (3) *L. buchneri*, (4) *L. plantarum*, а также семейство *Leuconostocaceae* и род *Pediococcus*. Было установлено, что бактерии, склонные к определенному типу брожения, формируют отдельные клады и филогенетические особенности. Так, представители *Lactobacillaceae*, имеющие один тип брожения, вероятно, имеют общего эволюционного предка. Основные различия в активности ферментов между представителями гомо- и гетероферментативных МКБ, выявленные в исследовании [44], можно представить следующим образом: гомоферментативные виды преимущественно демонстрируют альдолазную и фосфофруктокиназную активность, в то время как для гетероферментативных представителей характерна повышенная активность лактатдегидрогеназ, ответственных за синтез различных изомеров МК, а также глицерол-дегидратазы, фермента, участвующего в превращении глицерина в 3-гидроксипропионовый альдегид (3-ГПА) в двухстадийном процессе. Эта активность является ключевой частью вторичного метаболического процесса МКБ. В исследовании также показана активность фермента двухдоменной алкогольдегидрогеназы, участвующей в метаболизме этанола и в некоторых случаях маннитдегидрогеназы, характерных для большинства гетероферментативных представителей *Lactobacillus*. Гомоферментативные виды проявляют активность пируватформатлиазы, ключевого участника анаэробного превращения пирувата в ацетил-КоА и формиат. У ряда представителей обнаружена орнитиндекарбоксилазная активность, обусловленная необходимостью выработки защитных механизмов для активного роста и размножения бактерий.

Отдельно стоит отметить, что гетероферментативные организмы в результате своей эволюции могли утрачивать гены фосфотрансферных систем (PTS) [44]. Такая тенденция для МКБ является устойчивой и обоснована предпочитаемой средой обитания, богатой нутриентами [47]. Молоко представляет собой питательную среду, богатую легкоусвояемыми углеводами, витаминами, минеральными веществами, а также высококачественными белками. Благодаря своему составу, данный субстрат создает оптимальные условия для развития микроорганизмов, в том числе МКБ. В процессе адаптации МКБ обзавелись генами протеазы и аминокептидазы, для успешного гидролиза казеина [48]. В ходе эксперимента с использованием *L. helveticus* L1 и двух мутантных штаммов, полученных путем мутагенеза и утративших аминокептидазную активность, были изготовлены сыры, которые отличались горечью и повышенной твердостью [49]. Также изоляты МКБ *L. casei*, *L. paracasei* в ходе эволюции потеряли много генов, включенных в метаболизм углеводов и аминокислот. Среди таких

можно отметить гены, ответственные за использование мио-инозитола и таурина в качестве источников углерода и сульфата соответственно [50]. Помимо этого, при росте в молочной среде популяции МКБ достигают значительно более высокой плотности по сравнению, например, с кишечником, где их рост ограничен высокой конкуренцией со стороны разнообразной микробиоты. Однако такие крупные бактериальные скопления становятся уязвимыми для атак бактериофагов. В результате у МКБ, адаптированных к молочной среде, развились системы рестрикции-модификации (RM), гомологичные белки которых встречаются только у видов, обитающих в молоке [51]. МКБ в организме человека обитают в различных отделах, что определяет их адаптивные свойства. Например, у некоторых клинических изолятов *Lactocaseibacillus rhamnosus*, выделенных из ротовой полости, обнаружены гены биосинтеза экзополисахаридов. Эти соединения играют ключевую роль в адгезии бактерий к твердым поверхностям, таким как зубная эмаль [52].

В настоящее время МКБ *Lactobacillaceae* включают в себя более 260 видов и подвидов, которые нашли широкое применение в различных областях промышленности и биотехнологии. Среди них около 84 видов сертифицированы Европейской ассоциацией пищевых и кормовых культур (EFFCA) для безопасного использования в ферментированных пищевых продуктах [53]. Около 36 видов вошли в список микроорганизмов, рекомендованных квалифицированной презумпцией безопасности (QPS) Европейского агентства по безопасности пищевых продуктов (EFSA) [54]. Список QPS был обновлен в соответствии с последними таксономическими данными по родам *Bacillus* и *Lactobacillus*. Еще порядка 12 видов общепризнаны как безопасные (GRAS) согласно Управлению по контролю за продуктами питания и лекарственными средствами США (FDA) [16].

6. Генетическая регуляция синтеза молочной кислоты

Бактерии *Lactobacillaceae* широко известны своей способностью к синтезу МК в естественных условиях и обладают специфическими генами, кодирующими ферменты ее биосинтеза. Ключевыми генами являются гены ферментов лактатдегидрогеназ, которые катализируют конечный этап производства МК, а также гены, ответственные за транспортировку и метаболизм сахаров и регуляцию этих процессов.

Выработка МК у МКБ осуществляется преимущественно посредством гликолитического восстановления пирувата по пути ЭМП. Пируват восстанавливается до лактата с помощью НАДН-зависимых лактатдегидрогеназ (Ldh) — стереоспецифичных ферментов, катализирующих восстановление пирувата до D- или L-изомеров МК соответственно. Ферменты относятся к двум разным семействам и кодируются генами *ldhD* и *ldhL*. Большинство лактобацилл синтезируют оба изомера МК, однако их соотношение может существенно различаться из-за дифференциальной активности ферментов *LdhD* и *LdhL* [55,56]. Так, бактерии *L. casei*, *L. acidophilus*, *L. plantarum*, *L. delbrueckii*, *L. rhamnosus* при сбраживании субстратов с высокой концентрацией сахаров, включая агропромышленные отходы, производят более 95 % L-изомера МК. Однако некоторые штаммы *L. casei* и *L. delbrueckii* способны к синтезу D-изомера МК, что обусловлено снижением активности гена *ldhL* вследствие изменения средовых факторов. Синтез D-изомера МК также может быть опосредован активностью D-гидроксикапроат дегидрогеназы (HicD) [56–58]. Активность *hicD* наряду с *ldhL* показана для штамма *L. casei* BL23, продуцирующего оба изомера МК [59]. Мутантный по гену *ldhL* штамм *L. casei* BL23 сохраняет незначительную способность к синтезу L-изомера МК, на фоне которой существенно возросла продукция D-МК. Аналогичный эффект наблюдался и у других представителей МКБ с делецией гена *ldhL* или его гомологов. Кроме того, синтез D-изомера МК может быть опосредован активностью рацемазы, что продемонстрировано на примере *L. sakei* [60].

Реконструкция взаимодействия генов и белков, вовлеченных в процесс получения МК, основанная на методах биоинформатики, позволяет определить связи между ключевыми участниками процесса и визуализировать матрицу взаимодействий. Пример такой реконструкции, проведенный с использованием ресурса STRING-DB (<https://string-db.org/>) для *L. casei*, представлен на Рисунке 4.

Проведенный анализ сети генных взаимодействий, ассоциированных с получением МК, демонстрирует высокую статистическую значимость (p-value = 7.76e-07). Средний коэффициент кластеризации — 0,929, средняя степень связанности узла — 9,09. Количество узлов сети составило 11, число связей между ними — 50 (при ожидаемом значении по случайным причинам — 23). В узле выражено прогнозируемое совместное взаимодействие кластера генов *ldh*, *ldh-2*, *ldh3*, а также генов *KL175188.1* и *KL176472.1* (кластеризация выполнена по методу k-средних (k-means clustering) в программе STRING-DB).

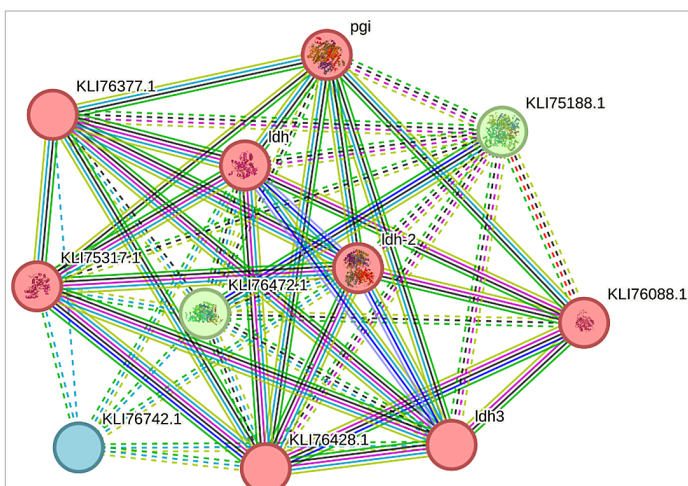


Рисунок 4. Общий вид сети взаимодействий между генами, вовлеченными в регуляцию процесса получения МК *L. casei*
Figure 4. General view of the network of interactions between genes involved in regulation of the process of lactic acid production by *L. casei*

Подобная реконструкция для *L. acidophilus* (штамм *Lactobacillus acidophilus* NCFM, способный к синтезу D-МК) в упрощенном варианте представлена на Рисунке 5.

Данный пример иллюстрирует наличие генных ассоциаций в кластере генов, ассоциированных с получением L- и D-МК (*ldh1*, *LBA1516*, *kpyK*, *ldhD*, включая *citH*) (p -value = 0,00121). Средний коэффициент кластеризации — 1, средняя степень связанности узла — 5. Количество узлов сети составило 6, число связей между ними — 15 (при ожидаемом значении по случайным причинам — 6). Кластеризация выполнена по методу k-средних (k-means clustering) в программе STRING-DB.

Аналогичный анализ для *L. delbrueckii* (штамм *L. delbrueckii* subsp. *bulgaricus* ATCC11842) представлен на Рисунке 6.

Для *L. delbrueckii* subsp. *bulgaricus* ATCC11842 также наблюдается тесная ассоциация генов кластера, ассоциированного с метаболизмом пирувата и получением L- и D-изомеров МК (*ldh*, *pyk*, *ldhA*, *Ldb1010*) (p -value = 0,000506). Образование D-изомера находится под контролем гена *ldhA*, а также вспомогательных генов, регулирующих различные этапы конверсии субстрата в процессе метаболизма. Средний коэффициент кластеризации — 1, средняя степень связанности узла — 5. Количество узлов сети составило 6, число связей между ними — 15 (при ожидаемом значении по случайным причинам — 6). Кластеризация выполнена по методу k-средних (k-means clustering) в программе STRING-DB.

В целом, расширенный биоинформатический анализ генных и белковых взаимодействий, ассоциированных с получением МК в рассмотренных примерах, позволит установить наличие кросс-функциональных связей в различных метаболических путях. Это свидетельствует о наличии общих адаптационных механизмов и путей утилизации субстрата у различных представителей МКБ семейства *Lactobacillaceae*. Понимание основных молекулярных и функциональ-

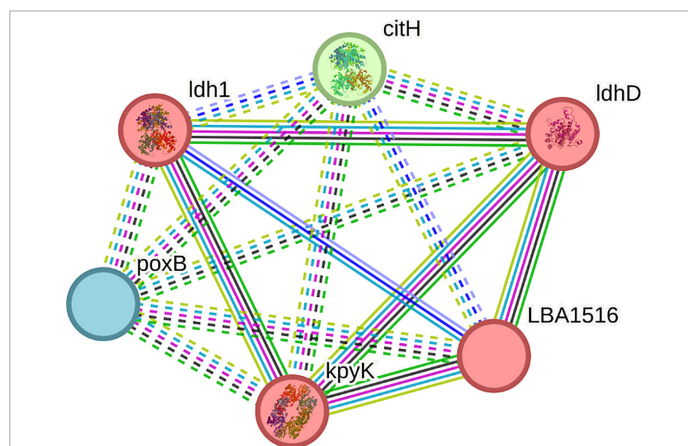


Рисунок 5. Упрощенный вид сети взаимодействий между генами, вовлеченными в регуляцию процесса получения D- и L-МК штамма *L. acidophilus* NCFM

Figure 5. Simplified view of the network of interactions between genes involved in the regulation of the process of production of D- and L-lactic acid by the strain *L. acidophilus* NCFM

ных закономерностей реализации тех или иных путей метаболизма позволит предметно подходить к выбору отдельных штаммов лактобактерий и достигать высоких выходов целевого продукта.

7. Метаболизм, опосредованный лактатрацемазой

Лактатрацемаза — это Ni-зависимый фермент, катализирующий рацемизацию МК в смесь D- и L-изомеров. Активация этого фермента осуществляется за счет взаимодействия с апоферментом в присутствии Ni, который служит кофактором для каталитической активности фермента.

Впервые активность специфической лактатрацемазы (*Lar*) была зарегистрирована у *Clostridium beijerinckii* [61]. С тех пор она была обнаружена у нескольких видов бактерий, включая лактобациллы [62]. Так, наличие лактатрацемазной активности было показано для штаммов *Lactobacillus curvatus* и *L. paracasei* subsp. *paracasei*. Изначально высокий уровень экспрессии гена *ldhL* в этих штаммах приводил к накоплению преимущественно L-изомера МК, что индуцировало активность лактатрацемазы и, в конечном итоге, способствовало образованию почти эквимолярного соотношения обоих изомеров [55]. Индуцированная L-МК активность рацемазы *Lar* была изучена на примере штамма *L. plantarum* NCIMB8826 [63]. В исследованиях установлен локус *lar*, состоящий из шести генов, организованных в единый оперон: *larA*, *larB*, *larC1*, *larC2*, *glpF1*, *larD* и *larE*. Участие данного оперона в рацемизации лактата было подтверждено путем конститутивной сверхэкспрессии полного оперона *lar* в штамме *L. plantarum* с делецией гена *ldhL* [64]. Дополнительно было показано, что делеция оперона *lar* приводит к полному прекращению продукции D-изомера МК в штамме с мутацией в гене *ldhD* [65]. Однако у *L. casei* сверхэкспрессия как полного оперона *lar*, так и отдельных его генов, не вызывала активности лактатрацемазы.

За исключением некоторых генов оперона (гена *glpF1* и гена *larD*, кодирующих мембранный белок семейства авкаглицерополинов и белок-транспортер МК, ответственный за скорость рацемизации соответственно), роль остальных генов в рацемизации не определена. Хотя экспрессия *lar* необходима для рацемизации МК, вероятно, это не единственный фактор, определяющий активность рацемазы. Следует предположить возможную активность отдельных генов или их кластеров, расположенных вне оперона *lar*, даже при условии, что их активность не зависит от наличия L-МК.

Кроме того, в исследовании [63] была продемонстрирована абсолютная зависимость штамма *L. plantarum* NCIMB8826 от D-МК, которая необходима для биосинтеза клеточной стенки. Эти данные согласуются с ранее полученными результатами, согласно которым D-МК способна включаться в терминальную позицию предшественника пептидогликана вместо D-аланина [65]. Аналогичная особенность наблюдалась у штаммов *Pediococcus pentosaceus*, *Leuconostoc mesenteroides* и *L. casei*, демонстрирующих повышенную устойчивость к ванкомицину [65–67]. Продукция D-МК в этом случае, вероятно, обусловлена активностью гена *hicD*, в отличие от штаммов, например, *L. helveticus* и *L. delbrueckii* subsp. *bulgaricus* с повышенной чувствительностью к ванкомицину. МКБ с эволюционной адаптацией, основанной на включении D-МК в пептидогликан мембраны, сохранили активность генов *lar* для обеспечения стратегического запаса D-МК.

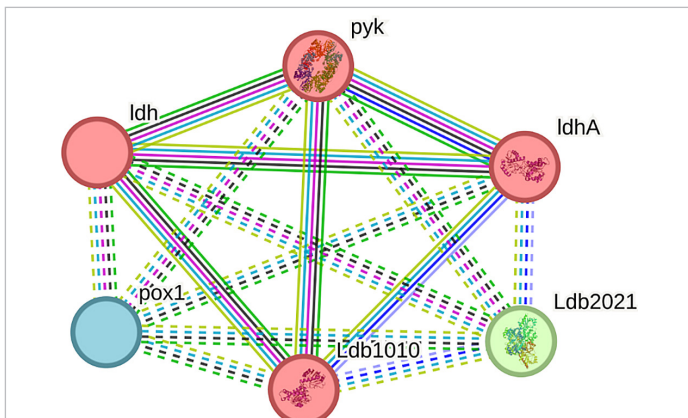


Рисунок 6. Упрощенный вид сети взаимодействий между генами, вовлеченными в регуляцию процесса получения D- и L-МК штамма *L. delbrueckii* subsp. *bulgaricus* ATCC11842
Figure 6. Simplified view of the network of interactions between genes involved in the regulation of the process of production of D- and L-lactic acid by the strain *L. delbrueckii* subsp. *bulgaricus* ATCC11842

8. Альтернативный путь метаболизма на примере манделатрацемазы

Другой известной рацемазой α -гидроксикислот, помимо лактатрацемазы, является манделатрацемаза — Mg-зависимый фермент суперсемейства енолаз [68]. Большинство известных рацемаз представляют собой аминокислотные рацемазы, которые подразделяются на два класса: пиридоксаль-5'-фосфат-зависимые (PLP-зависимые) и PLP-независимые ферменты [69]. Каталитический механизм манделатрацемазы, как и PLP-независимых рацемаз, основан на стабилизации депротонированного промежуточного соединения за счет внутримолекулярных взаимодействий [68,70]. Вследствие отсутствия электроноакцепторной группы на лактате, активность лактатрацемазы, вероятно, имеет иной механизм. В исследовании [71] была определена генетическая основа рацемизации лактата в *L. plantarum*. Установлено, что лактатрацемаза является Ni-зависимым ферментом с многодоменной структурой класса α/β -складчатость. Вспомогательные белки LarB, LarC и LarE, необходимые для активности лактатрацемазы, участвуют во включении Ni в апопротеин фермента (отсутствие белков приводит к образованию неактивного фермента без Ni). В дополнение к основным ферментам Lar частью системы являются белок-переносчик никеля Lar(MN)QO, участвующий в формировании мембранного канала переноса МК, LarD и регулятор транскрипции LarR. Комплекс вспомогательных белков способствует экспрессии генов *lar* при избытке L-МК в *L. plantarum* и многих других представителей МКБ. Таким образом, активность лактатрацемазы во многом обусловлена двумя кластерами генов — *larABCDE* и *larR(MN)QO*, транскрибируемых в противоположных направлениях. Индукция *larABCDE*, обусловленная присутствием L-МК, запускает связывание транскрипционного регулятора LarR с образованием структуры Lar-box [72]. Предполагается, что LarR может участвовать в регуляции других функций помимо рацемизации лактата. Оперон *lar* также присутствует у *L. brevis*, *Ligilactobacillus fermentum*, *L. sakei* и у некоторых других представителей *Lactobacillaceae*. В общем виде процесс образования D-МК, опосредованный системой Lar и ферментами лактатдегидрогеназ, представлен на Рисунке 7.

Содержание генов оперона *lar* в МКБ обычно ограничено четырьмя представителями (*larA*, *larB*, *larC* и *larE*). Еще два гена — *larD* и *larR* — могут присутствовать либо одновременно, либо по отдельности, как вспомогательные для активации рацемазы и перемещения МК через мембрану клетки [73]. При этом наличие полного кластера генов *lar* (*lar ABCDE*), по-видимому, ограничивается несколькими видами семейства *Lactobacillaceae*. Данные по включению генов кластера *lar* на основе *in silico* анализа представлены в работе [71]. В полном варианте кластер *lar* представлен лишь у отдельных представителей МКБ, среди которых штаммы *Lactobacillus brevis* ATCC367 и *Lactobacillus fermentum* ATCC14931 с порядком генов в кластере *lar ABCED*, штаммы *Lactobacillus plantarum* WCF51 и *Lactobacillus sakei*

subsp. *sakei* 23K — *lar ABCDE*. Наиболее сильно различающаяся последовательность генов кластера выявлена у *Pediococcus pentosaceus* ATCC25745 — *lar ABCDE* и *Enterococcus faecalis* T1 — *lar DCBAE*. Большинство представителей МКБ содержит сильно редуцированную представленность генов оперона *lar*, полнота функций которого также различается у разных видов и штаммов МКБ.

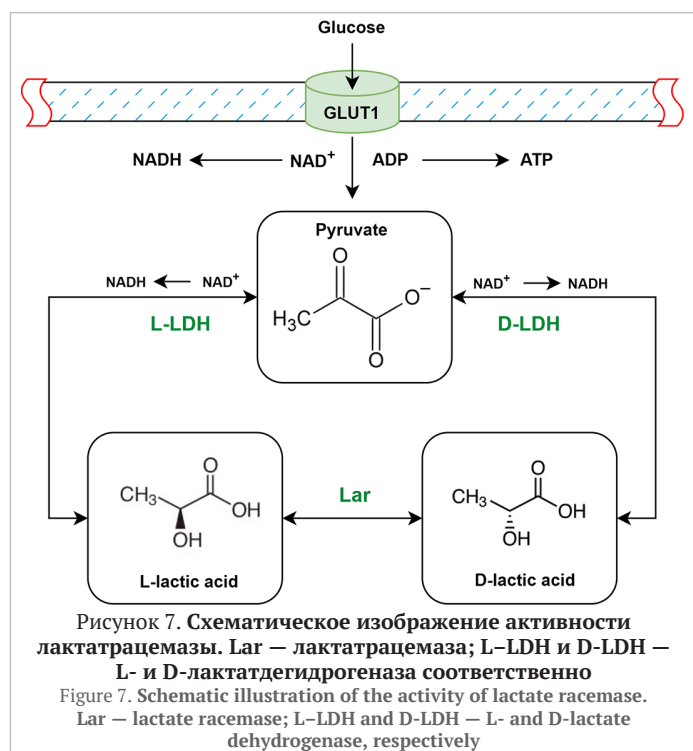
В целом, механизм рацемизации изомеров МК может выполнять не только структурную функцию в биосинтезе клеточной стенки, но и играть ключевую роль в метаболизме МК у лактобацилл. Биоинформатический анализ *lar*-локусов у представителей *Lactobacillaceae* свидетельствует, что отдельные гомологи LarA потенциально способны катализировать различные биохимические реакции и выполнять функции, выходящие за рамки стереоизомеризации МК.

9. Механизм углеродной катаболитной репрессии

Широкое экологическое распространение *Lactobacillaceae* отражает их метаболическую гибкость в отношении утилизации широкого спектра углеводов [74]. Однако лактобациллы редко используют разные источники углерода одновременно. Как говорилось ранее, некоторые представители МКБ демонстрируют проявление механизма углеродной катаболитной репрессии, что позволяет бактериям быстро адаптироваться к предпочтительному источнику углерода. Анализ метаболических путей лактозы/галактозы некоторыми представителями *Lactocaseibacillus* (*L. paracasei*, *L. casei*, *L. rhamnosus*) продемонстрировал способность штаммов транспортировать лактозу и галактозу в клетки с последующим расщеплением β -галактозидазой до лактозы/галактозы-6-фосфата без высвобождения свободной галактозы. Механизм CCR опосредован белком-регулятором катаболитного контроля A (CcpA) семейства *LacI-GalR*, который транскрипционно регулирует экспрессию большого количества генов в ответ на высокую концентрацию фруктозо-1,6-бисфосфата или высокий уровень АТФ в среде [75]. Белок CcpA является ключевым фактором ингибирования катаболизма углеводов в многосоставной питательной среде или при избыточном содержании сахаров. Это проявляется в подавлении экспрессии генов, участвующих в метаболизме других сахаров, и в субстратной избирательности в отношении глюкозы как наиболее эффективного источника энергии. В исследовании с *L. paracasei* активация CcpA в присутствии глюкозы приводила к ингибированию утилизации лактозы, маннозы и фруктоолигосахарида, опосредованному транскрипционными регуляторами *LacI*, *LacT* и *LacR* кластера *lac* [76]. Также было показано, что индукция CcpA, опосредованная фруктозо-1,6-бисфосфатом (FBP) и глюкозо-6-фосфатом (Glc-6-P), частично ответственна за подавление глюкозой транскрипции метаболизма лактозы, фруктозы и целлобиозы [77]. Аналогичный эффект наблюдается при использовании мальтозы, реже — галактозы.

При наличии предпочтительного субстрата происходит активация белка CcpA с образованием комплекса с корепрессором Hpr, фосфорилированного по Ser46 (Hpr-Ser-P) [78,79]. Комплекс CcpA/Hpr-Ser-P обладает повышенным сродством к элементам, реагирующим на катаболиты (*cre*), что подавляет или усиливает экспрессию генов в зависимости от положения *cre* по отношению к операторной последовательности. Белок P-Ser-Hpr служит центральным регулятором углеродного обмена у грамположительных бактерий, а также играет важную роль в развитии вирулентности некоторых патогенов. Область *cre* часто расположена в районе промотора или внутри открытых рамок считывания (ORF) регулируемых генов и оперонов [80]. Образование комплекса CcpA/*cre* приводит к репрессии транскрипции генов, ответственных за утилизацию альтернативных (менее предпочтительных) субстратов. Глобальная регуляция механизма катаболитной репрессии включает три основных типа транспортеров — PTS, ABC и GHP системы, чьи гены часто организованы в общие локусы с гликозидазами и регуляторными белками. Интенсивность CCR ослабевает при снижении концентрации предпочтительного субстрата в среде [77].

Проявление механизма углеродной катаболитной репрессии зарегистрировано у нескольких видов лактобацилл, где он участвует в регуляции аэробного и анаэробного метаболизма, способствуют устойчивости к стрессу и продукции метаболитов [81–83]. Ключевая роль белка CcpA, кодируемого геном *ccpA*, в отношении регуляции метаболизма фруктоолигосахаридов (FOS) показана в *L. plantarum*. Регуляция метаболизма FOS происходит посредством прямого связывания CcpA с сайтами *cre* в областях промотора FOS-кластеров [84]. Некоторые *cre*-подобные последовательности были идентифицированы в оперонах для утилизации FOS в *L. acidophilus* NCFM [81]. Гомология по CcpA и активности вовлеченных генов наблюдается у *Lactobacillus pentosus*, *L. lactis*, гомолога белка CcpA — PepR1



L. delbrueckii subsp. *lactis*, а также у *L. casei*, *L. acidophilus*. У многих представителей МКБ механизм CCR выражен слабее или отсутствует полностью, что отражает их адаптацию к специфическим экологическим нишам и метаболическим стратегиям.

10. Влияние условий среды на метаболизм молочной кислоты

10.1. Метаболизм цитрата как путь спасения

Помимо регуляции катаболических путей углеводов, изменения в составе питательной среды могут активировать альтернативные метаболические пути. Снижение pH или появление цитрата в среде может индуцировать экспрессию генов цитратного локуса. Возможность метаболизировать цитрат присутствует не у всех МКБ, поскольку подразумевает наличие генов, кодирующих цитратпермеазу (*citP*) и цитратлиазу (кластер генов *citDEF* и других). Цитратлиаза является ключевым ферментом метаболизма цитрата, который катализирует расщепление цитрата на оксалоацетат и ацетат. Цитратлиаза представляет собой мультиферментный комплекс, состоящий из трех белков: ацилпереносящего белка (ACP); цитрат, ацетат-ACP-трансферазы; цитрил-S-ACP-лиазы. Для некоторых бактерий, например, *L. mesenteroides*, *L. lactis*, *Weissella paramesenteroides*, *Enterococcus faecalis*, *Oenococcus Oeni* характерно наличие общих генов в цитратном локусе *cit*. Такой локус включает: ген *citI*, кодирующий транскрипционный активатор оперона, семейства бактериальных регуляторных белков SorC/DeoR; генный кластер *mae/citM*, кодирующий растворимую оксалоацетатдекарбоксилазу, что обеспечивает превращение оксалоацетата в пируват; генный кластер *citP/maeP*, кодирующий белки-транспортеры цитрата и некоторые другие гены локуса *cit* (*citC*, *citD*, *citE* и другие), кодирующие различные субъединицы цитратлиазы и ее активаторные компоненты [85–87]. У других бактерий с активностью генов, кодирующих цитратлиазу, включая *L. acidophilus* и *L. casei*, могут наблюдаться вариации в кластере *cit*. Например, *L. casei* вместо *citI* содержит ген *citO*, кодирующий транскрипционный активатор семейства GntR, а связанная с мембраной оксалоацетат декарбоксилаза кодируется генами *oadA*, *oadB*, *oadD* и *oadH* [88].

Рассмотрим механизм метаболизма цитрата на примере *L. casei*. Присутствие цитрата в среде приводит к его захвату и транспорту

в клетку при участии цитратного транспортера CitP, кодируемого геном *citP*, где он вовлекается в процесс образования цитоплазматического пирувата. Ген *citP* кодирует транспортер семейства переносчиков 2-гидроксикарбоксилата (2-НСТ), которые облегчают перемещение 2-гидроксикарбоксилатов, включая цитрат, малат и МК, через клеточные мембраны. Далее цитрат расщепляется на оксалоацетат и ацетат. Оксалоацетат затем декарбоксилируется до пирувата цитоплазматическим комплексом оксалоацетат декарбоксилазы (OAD) [89,90]. Дальнейшее преобразование пирувата может пойти различными путями (Рисунок 8).

Интересно отметить, что в отличие от некоторых видов *Lactobacillaceae* (*L. plantarum*, *L. helveticus*, *L. rhamnosus*), способных метаболизировать цитрат до сукцината через редуктивный путь, в *L. casei* этого не происходит. Это обусловлено спецификой генома, который, вероятно, не имеет функционального аналога транспортера CitT (образование сукцината из цитрата), но содержит ген *citH*, кодирующий транспортер CitH — представителя семейства CitMHS. Эти транспортеры обеспечивают симпорт комплекса цитрат-катион Ca^{2+} и протонов H^+ , что обеспечивает поглощение цитрата клеткой. Скорость утилизации цитрата в отсутствие ионов Ca^{2+} существенно падает, что указывает на низкий уровень конститутивной экспрессии генов полного пути метаболизма цитрата. При этом наличие в среде одновременно цитрата и ионов Ca^{2+} оказывает синергетический эффект и приводит к гораздо более сильной индукции в сравнении с вариантом, когда присутствует только один из компонентов [88]. В то же время метаболизм цитрата, по-видимому, не оказывает существенного влияния на скорость роста и накопление биомассы, но может препятствовать закислению питательной среды, особенно на поздней стадии роста бактерий. На примере *L. lactis* subsp. *lactis* biovar *diacetylactis* показано использование цитрата в качестве вторичного источника генерации протонной градиенты (PMF) [89]. Усиленный PMF стимулирует рост клеток за счет увеличения внутриклеточного окислительно-восстановительного потенциала (ОВП) и подавления повторного окисления кофакторов.

Образование ацетона указывает на активность генов *ALS* и α -ALDC, кодирующих α -ацетолактатсинтазу и α -ацетолактатдекарбоксилазу соответственно. Нарботка ацетата из пирувата осуществляется при участии ферментов пируватдегидрогеназы (PDH), пируватоксидазы

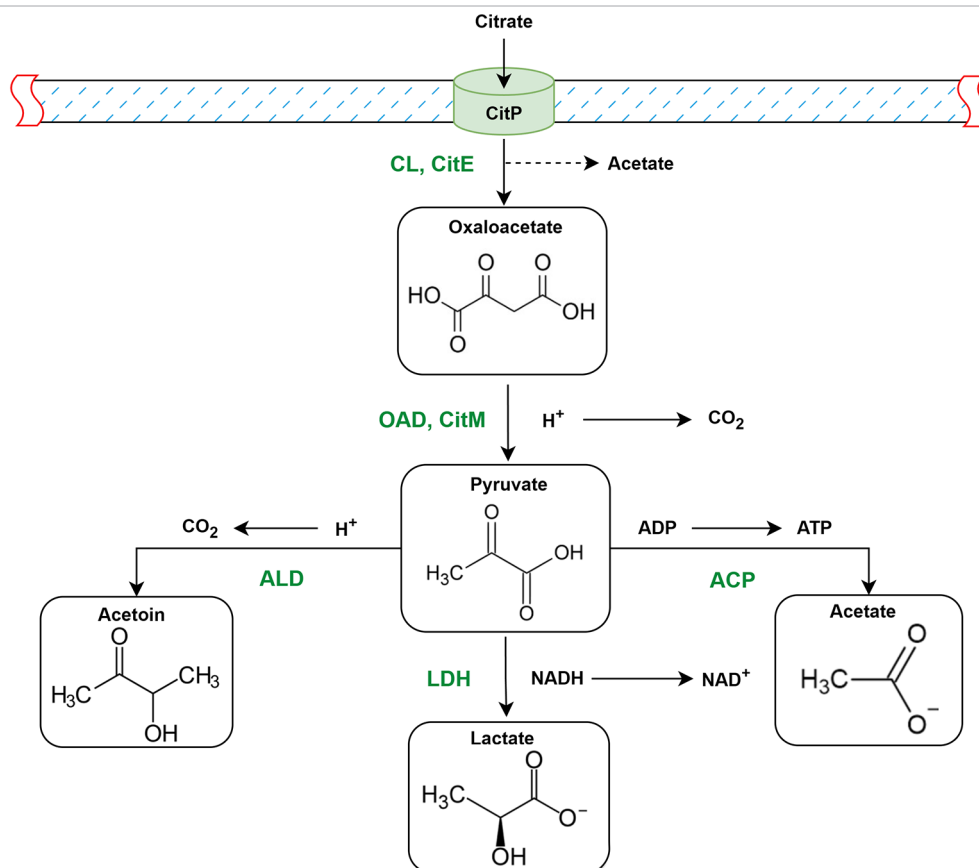


Рисунок 8. Схематическое представление пути метаболизма цитрата. CL — цитратлиаза; OAD — оксалоацетатдекарбоксилаза; ALD — α -ацетолактатдекарбоксилаза; ACP — ацетилфосфатаза; LDH — лактатдегидрогеназа

Figure 8. Schematic illustration of the pathway of citrate metabolism. CL — citrate lyase; OAD — oxaloacetate decarboxylase; ALD — α -acetolactate decarboxylase; ACP — acetyl phosphatase; LDH — lactate dehydrogenase

(РОХ), в некоторых случаях пируват-форматлиазы (PFL) под контролем соответствующих генов. Принято считать, что РОХ играет главную роль в аэробном росте гомоферментативных и ряда гетероферментативных молочнокислых бактерий. В исследовании на *L. brevis* ATCC367 показана доминантная и вспомогательная роль PDH и РОХ соответственно в аэробном превращении лактата в ацетат. Активность генов *pdh* и *roh* в аэробных условиях на фоне истощения глюкозы возрастала в 37,92 и 18,32 раза соответственно [91]. У штаммов *L. casei*, *L. acidophilus*, *L. delbrueckii*, *L. sakei* и подобных основной путь образования ацетата из пирувата при ферментации сахаров или цитрата может проходить через пируватформатлиазу (PFL) под контролем одноименного гена *pfl*. Считается, что этот механизм больше характерен для строгих анаэробов [92]. Накопление ацетата обнаружено в аэробных культурах как гомоферментативных, так и гетероферментативных видов, включая *L. casei*, *L. plantarum*, *L. rhamnosus*, *L. reuteri*, *L. spicheri*, при этом МК всегда оставалась основным конечным продуктом превращения пирувата. Накопление ацетоина наблюдалось в культурах *L. rhamnosus* и *L. casei* [93].

Полный путь метаболизма цитрата включает серию генов, кодирующих ферменты, необходимые для транспорта цитрата и его последующего превращения в различные метаболиты, такие как уксусная кислота, диоксид углерода и другие соединения. Среди таких генов можно выделить *citP*, *citC* (ген, кодирующий цитратдегидрогеназу), *citE* и *citF* (превращение оксалоацетата и ацетальдегида в уксусную кислоту, метаболизм цитрата), а также *citG* в составе оперона *cit*. Регуляция экспрессии цитратного локуса может быть обусловлена высокой активностью таких активаторных белков, как CitI, CitR или CitO, действующих на уровне транскрипции и/или посттранскрипции, которые кодируются генами *citI*, *citR* или *citO* соответственно. Совокупность генов и последовательность их активации может различаться у разных штаммов *Lactobacillaceae* и других представителей МКБ. В целом, способность одновременного метаболизма углеводов и цитрата дает преимущество для получения целевых продуктов, включая МК, поскольку может значительно усилить рост бактерий и сохранить их высокую жизнеспособность.

10.2. Влияние кислотности среды на накопление молочной кислоты

Другим примером метаболической адаптации является способность некоторых МКБ демонстрировать повышенную устойчивость к закислению среды. В зависимости от условий закисления и преобладания органических/неорганических кислот в среде, активность генов, ответственных за метаболизм субстрата и наработку МК, может меняться.

Механизм толерантности к кислоте подробно изучался на *L. lactis*, *L. bulgaricus*, *L. casei*, *L. plantarum*, *L. reuteri* [94–97]. Среди ключевых механизмов кислотоустойчивости грамположительных бактерий могут выступать протонные насосы H^+ -АТФазы, белки-участники системы восстановления/деградации поврежденных клеточных компонентов, повышение экспрессии регуляторов (локальные/глобальные ответные реакции), изменения в составе клеточной стенки, активность систем глутаматдекарбоксилазы (GAD) и аргининдекарбоксилазы (ADI) бактерий [96]. Для *L. acidophilus* хорошо охарактеризована система поддержания внутриклеточного pH на основе F_0F_1 -АТФазы [98]. Выявлен оперон *atp*, который содержит восемь генов, кодирующих различные субъединицы F_0F_1 -АТФазы. Гены, кодирующие субъединицы компонента F_0 (a, c, b) и компонента F_1 (δ , α , γ , β , ϵ), были расположены в порядке *atpBEFHAGDC* соответственно. Увеличение мРНК *atp* наблюдалось при индукции низким pH и сопровождалось увеличением активности фермента в мембранных экстрактах. В исследовании [99] при анализе полной последовательности генома *L. acidophilus* NCFM были выявлены четыре ORF, потенциально участвующие в формировании кислотоустойчивости штамма. Среди обнаруженных генов выявлены: гены антипортера (La57) и пермеазы аминокислот (La995), локализованные вблизи с орнитиндекарбоксилазой (La996), а также гены транскрипционного регулятора (La867). Для последнего установлена ограниченная гомология с GadrR — регулятором оперона *gadCB* *L. lactis* [100]. Обнаруженные гены всех ORF способствовали выживанию клеток при индуцированном HCl или МК снижении pH до 3,5. Было также показано, что предварительная инкубация клеток в условиях pH 5,5 в течение 1 часа способствует повышению кислотоустойчивости, что демонстрирует общую эволюционную адаптацию *L. acidophilus* к росту в среде с низким pH. Кроме того, для *L. acidophilus* показана индуцированная кислотностью сверхэкспрессия стресс-белков, в частности белков оперона GroESL и гена глутамат-ГАМК-антипортера *gadC*, играющих важную роль в кислотоустойчивости [101,102].

Другим примером является *L. plantarum*, гомоферментативная бактерия, способная к метаболизму гексозы и пентозы в МК. Наряду с *L. acidophilus*, *L. plantarum* проявляет повышенную устойчивость к закислению среды, обусловленной накоплением МК, что делает его удобным штаммом для промышленного использования [103]. Интересно, что кислотное состояние по-разному влияет на адаптацию бактерий, регулируя экспрессию генов, активность которых может различаться при действии органических и неорганических кислот. Такой эффект был показан в исследовании [104] при ферментации *L. plantarum* на стандартной среде MRS. В работе был проведен анализ транскриптома бактерий после обработки L- и D-МК рацемической смесью кислот и HCl на ранней стадии роста. Исследователями установлено статистически значимое изменение экспрессии 67 генов ($\log_2FC > 2$ или < 2). При этом, независимо от типа использованных кислот, наблюдалась повышенная экспрессия генов, ассоциированных с метаболизмом жирных кислот, ацил-КоА-карбоксилазы, ацилпереносящих белков, оксоацил-АПБ-редуктазы, а также оксоацил-АПБ-синтазы, ацил-КоА-гидролазы и генов мембранных белков. Аналогичная ситуация наблюдалась в экспрессии генов, связанных с ацетил-КоА-синтазой (*accA2*, *accB2*, *accC2*, *accD2*, *fabD*, *fabF*, *fabG1*, *fabI*, *acpA2* и *fabH2*). Воздействие рацематом МК приводило к увеличению экспрессии генов *lar* (*larB*, *larC1* и *larC2*), связанных с рацемизацией лактата. При этом большее влияние на изменение экспрессии оказывала L-МК. Это подтверждается данными, демонстрирующими способность некоторых видов МКБ продуцировать и накапливать L-изомер МК с последующим накоплением D-МК вплоть до образования эквимолярного рацемата [105].

Что касается генов, непосредственно связанных с метаболизмом МК, а именно, генов *ldh* (*ldhD*, *ldh1* и *ldh2*), их экспрессия снижалась при закислении среды, независимо от природы подкисляющих агентов. Такой эффект наблюдался также для генов, связанных с ферментацией малолактатной кислоты (*mleR1*, *mae*, *mels* и некоторых других). Анализ влияния других органических кислот, например, яблочной и уксусной, показал значительное увеличение экспрессии генов *lar* под влиянием яблочной и в меньшей степени уксусной кислоты. Уровень экспрессии *ldh* существенно не менялся, однако наблюдалась интересная закономерность: паттерн экспрессии генов *ldhD* и *ldh2* демонстрировал увеличение, а *ldh1* — снижение в ответ на обработку как уксусной, так и яблочной кислотами.

Следовательно, органические кислоты способны оказывать ингибирующее действие на рост *L. plantarum*, тогда как HCl такого эффекта не проявляет. Вероятно, аналогичная закономерность будет наблюдаться и для других неорганических кислот. Одной из возможных причин ингибирующего эффекта органических кислот, в отличие от HCl, может являться способность их недиссоциированных форм проникать в клетку, потенциально оказывая дифференцированное ингибирующее действие [106,107]. Это согласуется с данными о токсическом влиянии органических кислот на бактерии [108]. В совокупности такие результаты демонстрируют способность органических кислот по-разному модулировать выработку МК, регулируя экспрессию соответствующих генов.

Специфические механизмы действия, индуцированные органическими кислотами, проявляет большой спектр разнообразных бактерий, среди которых *Listeria monocytogenes*, *Staphylococcus aureus*, *Cronobacter sakazakii*, *Escherichia coli* и некоторые другие [109–111]. Для грамположительных бактерий также описан механизм кислотоустойчивости, опосредованный активностью GAD. Система кислотоустойчивости на основе GAD была описана для *L. lactis* и *L. brevis* [112]. Предполагаемая роль системы орнитиндекарбоксилазы в толерантности к закислению показана для *L. acidophilus* [99]. В отношении формирования кислотной толерантности *L. acidophilus* также продемонстрирована активная роль генов, кодирующих антипортер аминокислот, орнитиндекарбоксилазу, пермеазу аминокислот и транскрипционный регулятор. Анализ генов-кандидатов, ассоциированных с кислотоустойчивостью различных штаммов *L. bulgaricus*, выявил три гена: *dapA*, *dapH* и *lysC*, участвующих в синтезе лизина, активность которых обеспечивает толерантность к закислению *L. delbrueckii* subsp. *bulgaricus* LJ [113].

Адаптация к кислотному воздействию среды имеет решающее значение как для образа жизни, так и для промышленного использования многих МКБ. Понимание молекулярных механизмов, лежащих в основе синтеза МК у различных представителей *Lactobacillaceae*, а также факторов, влияющих на их продуктивность, открывает перспективы для целенаправленного выбора штамма-продуцента и оптимизации условий ферментации. Такой подход позволит получать целевой продукт с минимальными экономическими затратами, которые обычно требуются при поисковых исследованиях.

11. Практические следствия дихотомии.

Востребованность в производстве

Филогенетическая дихотомия между гомоферментативными и гетероферментативными штаммами *Lactobacillaceae* определяет фундаментальные различия в их метаболических путях [44] и востребованность в промышленном производстве МК. Промышленная значимость метаболических различий проявляется в продуктивности штаммов, которая во многом определяется условиями ферментации и типом субстрата. Например, *L. acidophilus* ATCC 43121 демонстрирует выход МК до 22,16 г/л при использовании пивных дробин, обработанных раствором аммиака с добавлением дрожжевого экстракта. При этом в синтетических средах выход МК составил 16,1 г/л [114]. В исследовании на *L. acidophilus* Ind-1 и *L. acidophilus* Lakcid при ферментации в обезжиренном молоке выход МК составил 12,73 г/л и 13,33 г/л соответственно [115]. В исследовании [116] был продемонстрирован ингибирующий эффект высоких концентраций глюкозы на развитие культуры *L. acidophilus*. Показано, что превышение концентрации глюкозы в среде выше 90 г/л может приводить к снижению продуктивности штаммов в отношении МК. Метаболическая гибкость *L. casei* позволяет этому виду эффективно утилизировать разнообразные субстраты. При ферментации на мелассе штамм *L. casei* MTCC1423 достигает концентрации МК 132 г/л при продуктивности в час 2,36 г/л [117]. На фруктовых отходах штамм *L. casei* DSMZ 20011 демонстрировал выход МК в концентрации 180,56 г/л с продуктивностью в час 0,88 г/л [118]. Однако в исследовании [119] при изучении свойств штамма *L. casei* GABIT96P004, изолированного из вермикомпоста, была получена концентрация МК более 50 г/л за 24 часа культивирования.

Важное промышленное значение имеет *L. Plantarum*, демонстрируя выдающуюся толерантность к ингибиторам лигноцеллюлозного происхождения и способность продуцировать до 65,6 г/л МК при ферментации на рисовой соломе [120]. Штамм *L. rhamnosus* ATCC10863 при ферментации мелассы демонстрирует наработку L-изомера МК в концентрации 22,0 г/л в режиме периодического культивирования с подпиткой [121]. Бактерии *L. helveticus* в оптимизированных условиях продуцируют L-МК с концентрацией до 50 г/л [122]. Штамм *L. brevis* ATCC367, благодаря наличию механизма катаболической репрессии, может одновременно утилизировать глюкозу и ксилоту, достигая выхода МК 0,80 г/г субстрата при совместной культивации с *L. plantarum* [123].

Получение оптически чистых изомеров МК является одним из критических важных аспектов промышленного производства. Это обусловлено в том числе пониженными физико-механическими характеристиками получаемых продуктов, например, полимолочной кислоты (PLA), на основе рацемических смесей [124,125]. Предпочтение отдается L-МК, которая хорошо метаболизируется, является безопасной и находит широкое применение в различных областях промышленности. Различные штаммы *L. acidophilus* и *L. casei* производят преимущественно L-МК, что обеспечивает их востребованность в пищевой и фармацевтической промышленности [10]. Современные исследования подчеркивают, что оптическая чистота L-изомера МК, получаемого при ферментации с участием *L. acidophilus*, достигает 97 % и выше [114,119]. Продуктивность некоторых штаммов *L. casei* в отношении L-МК достигает 96–98 % [126,127]. Скрининг штаммов *L. casei* Ke6, *L. casei* Ke8, *L. casei* Ke11 на различных субстратах выявил, что они способны продуцировать L-МК с оптической чистотой выше 95 % и с концентрациями до 175 г/л в оптимизированных условиях [128].

Однако получение D-изомера МК также остается актуальной задачей. В этом плане полезной является ферментация некоторых штаммов *L. delbrueckii*. Штамм *L. delbrueckii* HB49–2 в оптимизированных условиях демонстрирует выход D-изомера МК с концентрацией 82,15 г/л и оптической чистотой 99,89 % [129]. Это делает его востребованным в производстве PLA [125]. Штамм *L. delbrueckii* subsp. *lactis* QU41 продуцирует D-изомер МК концентрацией 20,1 г/л с оптической чистотой более 99,9 % при культивировании на классической среде MRS с добавлением 20 г/л глюкозы [130]. Штамм *L. delbrueckii* NCIM 2025 при ферментации на тростниковой мелассе достигает концентрации МК 84,50 г/л с продуктивностью в час 3,40 г/л [131]. В другом исследовании при ферментации агропромышленных отходов *L. delbrueckii* демонстрировал выход D-изомера МК в концентрации 162 г/л при продуктивности в час 3,37 г/л [132]. При ферментации на лигноцеллюлозной биомассе штамм *L. delbrueckii* ATCC11842 демонстрировал выход оптической чистоты D-МК [133].

Представители МКБ семейства *Lactobacillaceae* находят широкое применение в различных областях промышленности. Штамм *L. delbrueckii* subsp. *bulgaricus* занимает доминирующее положение

в молочной промышленности как основная закваска для производства йогурта в симбиозе с *Streptococcus thermophilus* [134,135]. Штамм *L. delbrueckii* 2038, специально адаптированный для промышленного производства йогурта, демонстрирует уникальные физиологические свойства, включая биосинтез лизина, продукцию формиата и эффективные системы рестрикции/модификации ДНК [134].

Некоторые виды *L. acidophilus* широко применяются в производстве функциональных молочных продуктов благодаря своим пробиотическим свойствам и способности к продукции различных антимикробных соединений [136,137]. Штаммы *L. casei* проявляют выдающуюся способность колонизировать различные природные и искусственные среды, что определяет их широкое использование в пищевой промышленности, в частности как кислотообразующих заквасок для молочных ферментаций и производстве бактериально-созревающих сыров [138,139]. Отдельные штаммы *Lactobacillus gasseri* находят применение в производстве бактериоцинов для биоконсервации пищевых продуктов, а также демонстрирует способность к подавлению роста *Helicobacter pylori* [136,140]. Отдельные штаммы *L. plantarum* используются для ферментации овощей, зерновых и соевых продуктов за счет продукции бактериоцинов и органических кислот [141]. Повышенная кислотоустойчивость и пробиотическая активность некоторых штаммов *L. rhamnosus* востребована при производстве заквасок для йогуртов и функциональных напитков [142,143].

Широкое применение представители *Lactobacillaceae* находят в фармацевтической промышленности. Например, *L. acidophilus* занимает лидирующие позиции среди пробиотических штаммов благодаря доказанной клинической эффективности при лактозной непереносимости, неалкогольной жировой болезни печени, синдроме раздраженного кишечника и гиперхолестеринемии [136]. Группа бактерий *L. casei* демонстрирует выдающийся терапевтический потенциал для профилактики и лечения заболеваний, связанных с нарушениями кишечной микрофлоры [138,143]. Механизмы полезного воздействия включают продукцию бактериоцинов, конкуренцию за сайты связывания патогенов и модуляцию иммунной системы [143]. Одним из наиболее инновационных направлений является использование экзосом, выделяемых *Lactobacillus*, как носителей терапевтических молекул. Эти внеклеточные везикулы способны модулировать иммунный ответ, восстанавливать барьерные функции кишечника и оказывать противовоспалительное действие, что подтверждено на моделях воспалительных и аутоиммунных заболеваний, а также при нарушениях микрофлоры и даже в терапии заболеваний печени и нервной системы [144].

Другим значимым направлением является создание лекарственных форм с живыми представителями *Lactobacillaceae* для локального применения. Так, вагинальные таблетки на основе *L. brevis*, *L. salivarius* и *L. plantarum* продемонстрировали эффективность в терапии бактериального вагиноза и в профилактике рецидивов, а быстрорастворимые формы обеспечивают высокую жизнеспособность бактерий при длительном хранении и удобство для индустриального производства [145]. В последние годы активно развивается направление использования постбиотиков и метаболитов *Lactobacillaceae*, таких как короткоцепочечные жирные кислоты, бактериоцины и гамма-аминомасляная кислота, для модуляции иммунитета, снижения воспаления и защиты тканей от повреждения при различных заболеваниях, включая диабет и нейродегенеративные расстройства [146]. Кроме того, генетически модифицированные штаммы *Lactobacillaceae* рассматриваются как перспективные живые системы для доставки терапевтических белков и вакцин, что уже проходит доклиническую и клиническую апробацию [147].

Потенциал представителей семейства *Lactobacillaceae* может быть значительно расширен методами генетической инженерии. Современные технологии редактирования генома позволяют не только увеличить выход продукта, но и целенаправленно контролировать стереоспецифичность продукции, что особенно важно для получения оптически чистых изомеров МК. Особое значение имеет возможность контроля стереоспецифичности через редактирование генов лактатдегидрогеназ. Так, инактивация гена *ldhD* в *L. paracasei* и введение гена *ldhL1* с помощью CRISPR/Cas9 в настоящее время позволяет получать штаммы-сверхпродуценты L-МК с оптической чистотой порядка 99,1 % [148]. Инактивация гена *ldhD* в *L. helveticus* приводит к сверхэкспрессии гена *ldhL* и к увеличению продукции L-МК на 20 % [149]. Высокая восприимчивость к генетическим манипуляциям продемонстрирована для *L. acidophilus*. Трудности с трансформацией некоторых видов и штаммов *Lactobacillaceae* решаются разработкой и оптимизацией систем и методов доставки. Штаммы *L. casei*, *L. delbrueckii*, *L. plantarum*, *L. acidophilus*, рассмотренные

в настоящем обзоре более подробно, также демонстрируют хороший потенциал для геномного редактирования с целью оптимизации наработки целевых продуктов, включая МК.

12. Выводы

Таким образом, рациональное использование бактерий семейства *Lactobacillaceae* в промышленном производстве в целом и для получения молочной кислоты в частности требует понимания их филогенетических, эволюционных и генетических особенностей. Сравнительный анализ механизмов адаптации ключевых производственных

штаммов, анализ их геномной архитектуры, а также специфики метаболизма и субстратной избирательности позволят предметно подойти к выбору штамма для конкретных технологических задач. Глубокое понимание особенностей штаммов молочнокислых бактерий позволит более эффективно проводить геномные манипуляции для увеличения выхода целевых продуктов и их чистоты. Это станет критически важным для снижения экономических затрат и повышения рентабельности производственных процессов. Дальнейшие исследования в этом направлении обеспечат переход от эмпирического подбора штаммов к прогнозируемому биотехнологическому дизайну.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / REFERENCES

- Wood, B. J. B., Holzappel, W. H. N. (1995). The Genera of Lactic Acid Bacteria. Springer New York, NY, 1995.
- Goldstein, E. J. C., Tyrrell, K. L., Citron, D. M. (2015). *Lactobacillus* species: Taxonomic complexity and controversial susceptibilities. *Clinical Infectious Diseases*, 60 (Suppl 2), S98–S107. <https://doi.org/10.1093/cid/civ072>
- Mokoena, M. P. (2017). Lactic acid bacteria and their bacteriocins: Classification, biosynthesis and applications against uropathogens: A mini-review. *Molecules*, 22(8), Article 1255. <https://doi.org/10.3390/molecules22081255>
- Abdel-Rahman, M. A., Tashiro, Y., Sonomoto, K. (2011). Lactic acid production from lignocellulose-derived sugars using lactic acid bacteria: Overview and limits. *Journal of Biotechnology*, 156(4), 286–301. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2011.06.017>
- Wang, Y., Wu, J., Lv, M., Shao, Z., Hungwe, M., Wang, J. et al. (2021). Metabolism characteristics of lactic acid bacteria and the expanding applications in food industry. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 9, Article 612285. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2021.612285>
- Bintsis, T. (2018). Lactic acid bacteria as starter cultures: An update in their metabolism and genetics. *AIMS Microbiology*, 4(4), 665–668. <https://doi.org/10.3934/microbiol.2018.4.665>
- Gänzle, M. G. (2015). Lactic metabolism revisited: Metabolism of lactic acid bacteria in food fermentations and food spoilage. *Current Opinion in Food Science*, 2, 106–117. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2015.03.001>
- Pastor, J. M., Borges, N., Pagán, J. P., Castaño-Cerezo, S., Csonka, L. N., Goodner, B. W. et al. (2019). Fructose metabolism in *Chromohalobacter salexigens*: Interplay between the Embden — Meyerhof — Parnas and Entner — Doudoroff pathways. *Microbial Cell Factories*, 18(1), Article 134. <https://doi.org/10.1186/s12934-019-1178-x>
- Prückler, M., Lorenz, C., Endo, A., Kraler, M., Dürrschmid, K., Hendriks, K. et al. (2015). Comparison of homo- and heterofermentative lactic acid bacteria for implementation of fermented wheat bran in bread. *Food Microbiology*, 49, 211–219. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2015.02.014>
- Martínez, F. A. C., Balciunas, E. M., Salgado, J. M., González, J. M. D., Converti, A., de Sousa Oliveira, R. P. (2013). Lactic acid properties, applications and production: A review. *Trends in Food Science and Technology*, 30(1), 70–83. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2012.11.007>
- Juturu, V., Wu, J. C. (2016). Microbial production of lactic acid: The latest development. *Critical Reviews in Biotechnology*, 36(6), 967–977. <https://doi.org/10.3109/07388551.2015.1066305>
- Zaunmüller, T., Eichert, M., Richter, H., Unden, G. (2006). Variations in the energy metabolism of biotechnologically relevant heterofermentative lactic acid bacteria during growth on sugars and organic acids. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 72(3), 421–429. <https://doi.org/10.1007/s00253-006-0514-3>
- Eiteman, M. A., Ramalingam, S. (2015). Microbial production of lactic acid. *Biotechnology Letters*, 37(5), 955–972. <https://doi.org/10.1007/s10529-015-1769-5>
- Arskold, E., Lohmeyer-Vogel, E., Cao, R., Roos, S., Radstrom, P., van Niel, E. W. J. (2008). Phosphoketolase pathway dominates in *Lactobacillus reuteri* ATCC55730 containing dual pathways for glycolysis. *Journal of Bacteriology*, 190(1), 206–212. <https://doi.org/10.1128/JB.01227-07>
- Kilstrup, M., Hammer, K., Jensen, P. R., Martinussen, J. (2005). Nucleotide metabolism and its control in lactic acid bacteria. *FEMS Microbiology Reviews*, 29(3), 555–590. <https://doi.org/10.1016/j.femsre.2005.04.006>
- Salveti, E., Fondi, M., Fani, R., Torriani, S., Felis, G. E. (2013). Evolution of lactic acid bacteria in the order Lactobacillales as depicted by analysis of glycolysis and pentose phosphate pathways. *Systematic and Applied Microbiology*, 36(5), 291–305. <https://doi.org/10.1016/j.syapm.2013.03.009>
- Fukui, S., Oi, A., Obayashi, A., Kitahara, K. (1957). Studies on the pentose metabolism by microorganisms. *The Journal of General and Applied Microbiology*, 3(4), 258–268. <https://doi.org/10.2323/jgam.3.258>
- Stincone, A., Prigione, A., Cramer, T., Wamelink, M. M. C., Campbell, K., Cheung, E. et al. (2015). The return of metabolism: Biochemistry and physiology of the pentose phosphate pathway. *Biological Reviews*, 90(3), 927–963. <https://doi.org/10.1111/brv.12140>
- Horecker, B. L. (2002). The pentose phosphate pathway. *Journal of Biological Chemistry*, 277(50), 47965–47971. <https://doi.org/10.1074/jbc.X200007200>
- Kim, K. H., Chun, B. H., Baek, J. H., Roh, S. W., Lee, S. H., Jeon, C. O. (2020). Genomic and metabolic features of *Lactobacillus sakei* as revealed by its pangenome and the metatranscriptome of kimchi fermentation. *Food Microbiology*, 86, Article 103341. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2019.103341>
- Shinkawa, S., Okano, K., Yoshida, S., Tanaka, T., Ogino, C., Fukuda, H. et al. (2011). Improved homo l-lactic acid fermentation from xylose by abolishment of the phosphoketolase pathway and enhancement of the pentose phosphate pathway in genetically modified xylose-assimilating *Lactococcus lactis*. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 91(6), 1537–1544. <https://doi.org/10.1007/s00253-011-3342-z>
- Burgé, G., Saulou-Bérion, C., Moussa, M., Allais, F., Athes, V., Spinnler, H.-E. (2015). Relationships between the use of Embden Meyerhof pathway (EMP) or Phosphoketolase pathway (PKP) and lactate production capabilities of diverse *Lactobacillus reuteri* strains. *Journal of Microbiology*, 53(10), 702–710. <https://doi.org/10.1007/s12275-015-5056-x>
- Posthuma, C. C., Bader, R., Engelmann, R., Postma, P. W., Hengstenberg, W., Pouwels, P. H. (2002). Expression of the Xylulose 5-Phosphate Phosphoketolase Gene, xpkA, from *Lactobacillus pentosus* MD363 is induced by sugars that are fermented via the phosphoketolase pathway and is repressed by glucose mediated by CcpA and the mannose phosphoenolpyruvate phosphotransferase system. *Applied and Environmental Microbiology*, 68(2), 831–837. <https://doi.org/10.1128/AEM.68.2.831-837.2002>
- Frey, P. A. (1996). The Leloir pathway: A mechanistic imperative for three enzymes to change the stereochemical configuration of a single carbon in galactose. *The FASEB Journal*, 10(4), 461–470.
- Rodríguez, J., Vázquez, L., Flórez, A. B., Mayo, B. (2022). Phenotype testing, genome analysis, and metabolic interactions of three lactic acid bacteria strains existing as a consortium in a naturally fermented milk. *Frontiers in Microbiology*, 13, Article 1000683. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.1000683>
- Ponnusamy, V., Sankaranarayanan, M. (2023). Targeted gene manipulation of Leloir pathway genes for the constitutive expression of β -galactosidase and its transgalactosylation product galacto-oligosaccharides from *Kluyveromyces fragilis* GG799 and knockout strains. *Enzyme and Microbial Technology*, 169, Article 110263. <https://doi.org/10.1016/j.enzmictec.2023.110263>
- Rozhkova, I. V., Yurova, E. A., Leonova, V. A. (2023). Evaluation of the amino acid analysis, and metabolic interactions of complex probiotic substances obtained on the basis of metabolites of probiotic bacteria *Lactocaseibacillus paracasei* ABK and *Lactobacillus helveticus* H9. *Fermentation*, 9(5), Article 460. <https://doi.org/10.3390/fermentation9050460>
- Yun, J.-S., Ryu, H.-W. (2001). Lactic acid production and carbon catabolite repression from single and mixed sugars using *Enterococcus faecalis* RKY1. *Process Biochemistry*, 37(3), 235–240. [https://doi.org/10.1016/S0032-9592\(01\)00205-9](https://doi.org/10.1016/S0032-9592(01)00205-9)
- Maeda, T., Yoshimura, T., Shimazu, T., Shirai, Y., Ogawa, H. I. (2009). Enhanced production of lactic acid with reducing excess sludge by lactate fermentation. *Journal of Hazardous Materials*, 168(2–3), 656–663. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.02.067>
- Abedi, E., Hashemi, S. M. B. (2020). Lactic acid production — producing microorganisms and substrates sources-state of art. *Heliyon*, 6(10), Article e04974. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04974>
- Pedersen, M. B., Garrigues, C., Tophile, K., Brun, C., Vido, K., Bennedsen, M. et al. (2008). Impact of aeration and heme-activated respiration on *Lactococcus lactis* gene expression: Identification of a heme-responsive operon. *Journal of Bacteriology*, 190(14), 4903–4911. <https://doi.org/10.1128/JB.00447-08>
- Siezen, R. J., van Hylckama Vlieg, J. E. (2011). Genomic diversity and versatility of *Lactobacillus plantarum*, a natural metabolic engineer. *Microbial Cell Factories*, 10 (Suppl 1), Article S3. <https://doi.org/10.1186/1475-2859-10-S1-S3>
- Karczewska, L., Lukjan, Z. (1969). 2 cases of atypical mycobacteria. *Gruźlica i Choroby Pluc i Pneumonologia*, 37(9), 863–867. (In Polish)
- Kim, D.-H., Lim, W.-T., Lee, M.-K., Kim, M.-S. (2012). Effect of temperature on continuous fermentative lactic acid (LA) production and bacterial community, and development of LA-producing UASB reactor. *Bioresource Technology*, 119, 355–361. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.05.027>
- Makarova, K. S., Koonin, E. V. (2006). Evolutionary genomics of lactic acid bacteria. *Journal of Bacteriology*, 189(4), 1199–2008. <https://doi.org/10.1128/JB.01351-06>
- Lawson, P. A. (2018). The phylum Actinobacteria. Chapter in the book: The Bifidobacteria and Related Organisms. Academic Press, 2018. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-805060-6.00001-6>
- Olofsson, T. C., Vázquez, A. (2008). Detection and identification of a novel lactic acid bacterial flora within the honey stomach of the honeybee *Apis mellifera*. *Current Microbiology*, 57(4), 356–363. <https://doi.org/10.1007/s00284-008-9202-0>
- Zheng, Z., Zhao, M., Zhang, Z., Hu, X., Xu, Y., Wei, C. et al. (2022). Lactic acid bacteria are prevalent in the infrabuccal pockets and crops of ants that prefer aphid honeydew. *Frontiers in Microbiology*, 12, Article 785016. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.785016>
- Muñoz-Atienza, E., Gómez-Sala, B., Araújo, C., Campanero, C., del Campo, R., Hernández, P. E. et al. (2013). Antimicrobial activity, antibiotic susceptibility and virulence factors of Lactic Acid Bacteria of aquatic origin intended for use as probiotics in aquaculture. *BMC Microbiology*, 13(1), Article 15. <https://doi.org/10.1186/1471-2180-13-15>
- Stackebrandt, E., Teuber, M. (1988). Molecular taxonomy and phylogenetic position of lactic acid bacteria. *Biochimie*, 70(3), 317–324. [https://doi.org/10.1016/0300-9084\(88\)90204-0](https://doi.org/10.1016/0300-9084(88)90204-0)
- Wetterstrand, K. A. (2023). DNA Sequencing Costs: Data. Retrieved from <https://www.genome.gov/about-genomics/fact-sheets/DNA-Sequencing-Costs-Data> Accessed August 7, 2025
- Vandamme, P., Pot, B., Gillis, M., de Vos, P., Kersters, K., Swings, J. (1996). Polyphasic taxonomy, a consensus approach to bacterial systematics. *Microbiological Reviews*, 60(2), 407–438. <https://doi.org/10.1128/mr.60.2.407-438.1996>

43. Sun, Z., Harris, H. M. B., McCann, A., Guo, C., Argimón, S., Zhang, W. et al. (2015). Expanding the biotechnology potential of lactobacilli through comparative genomics of 213 strains and associated genera. *Nature Communications*, 6(1), Article 8322. <https://doi.org/10.1038/ncomms9322>
44. Zheng, J., Ruan, L., Sun, M., Gänzle, M. (2015). A genomic view of lactobacilli and pediococci demonstrates that phylogeny matches ecology and physiology. *Applied and Environmental Microbiology*, 81(20), 7233–7243. <https://doi.org/10.1128/AEM.02116-15>
45. Konstantinidis, K. T., Tiedje, J. M. (2005). Towards a genome-based taxonomy for prokaryotes. *Journal of Bacteriology*, 187(18), 6258–6264. <https://doi.org/10.1128/JB.187.18.6258-6264.2005>
46. Qin, Q.-L., Xie, B.-B., Zhang, X.-Y., Chen, X.-L., Zhou, B.-C., Zhou, J. et al. (2014). A proposed genus boundary for the prokaryotes based on genomic insights. *Journal of Bacteriology*, 196(12), 2210–2215. <https://doi.org/10.1128/jb.01688-14>
47. Pfeiler, E. A., Klaenhammer, T. R. (2007). The genomics of lactic acid bacteria. *Trends in Microbiology*, 15(12), 546–553. <https://doi.org/10.1016/j.tim.2007.09.010>
48. Xing, Z., Geng, W., Li, C., Sun, Y., Wang, Y. (2017). Comparative genomics of *Lactobacillus kefirifaciens* ZW3 and related members of *Lactobacillus* spp reveal adaptations to dairy and gut environments. *Scientific Reports*, 7(1), Article 12827. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-12916-0>
49. Prost, F., Chamba, J. F. (1994). Effect of aminopeptidase activity of thermophilic lactobacilli on emmental cheese characteristics. *Journal of Dairy Science*, 77(1), 24–33. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(94\)76924-1](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(94)76924-1)
50. Fontana, A., Zaccari, C., Morelli, L. (2018). Genetic signatures of dairy *Lactobacillus casei* group. *Frontiers in Microbiology*, 9, Article 2611. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.02611>
51. O'Sullivan, O., O'Callaghan, J., Sangrador-Vegas, A., McAuliffe, O., Slattery, L., Kallita, P. et al. (2009). Comparative genomics of lactic acid bacteria reveals a niche-specific gene set. *BMC Microbiology*, 9(1), Article 50. <https://doi.org/10.1186/1471-2180-9-50>
52. Nadkarni, M. A., Chen, Z., Wilkins, M. R., Hunter, N. (2014). Comparative genome analysis of *Lactobacillus rhamnosus* clinical isolates from initial stages of dental pulp infection: Identification of a new exopolysaccharide cluster. *PLoS One*, 9(3), Article e90643. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0090643>
53. Bourdichon, F. P., Budde-Niekie, A., Dubois, A., Fritz, D., Hatte, J. L., Laulund, S. et al. (2022). Inventory of microbial food cultures with safety demonstration in fermented food products Update of the Bulletin of the IDF N° 377–2002, N° 455–2012 and N° 495–2018. *Bulletin of the International Dairy Federation*, 514. Retrieved from <https://openurl.ebsco.com/contentitem/gcd:157423297?sid=ebsco:plink:crawler&id=ebsco:gcd:157423297> Accessed August 7, 2025
54. Koutsoumanis, K., Allende, A., Alvarez-Ordóñez, A., Bolton, D., Bover-Cid, S., Chemaly, M. et al. (2020). Scientific opinion on the update of the list of QPS-recommended biological agents intentionally added to food or feed as notified to EFSA (2017–2019). *EFSA Journal*, 18(2), Article 05966. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2020.5966>
55. Garvie, E. I. (1980). Bacterial lactate dehydrogenases. *Microbiological Reviews*, 44(1), 106–139. <https://doi.org/10.1128/mr.44.1.106-139.1980>
56. Manome, A., Okada, S., Uchimura, T., Komagata, K. (1998). The ratio of L-form to D-form of lactic acid as a criteria for the identification of lactic acid bacteria. *The Journal of General and Applied Microbiology*, 44(6), 371–374. <https://doi.org/10.2323/jgam.44.371>
57. Razeto, A., Kochhar, S., Hottinger, H., Dauter, M., Wilson, K. S., Lamzin, V. S. (2002). Domain Closure, Substrate Specificity and Catalysis of d-Lactate Dehydrogenase from *Lactobacillus bulgaricus*. *Journal of Molecular Biology*, 318(1), 109–119. [https://doi.org/10.1016/S0022-2836\(02\)00086-4](https://doi.org/10.1016/S0022-2836(02)00086-4)
58. Viana, R., Yebra, M. J., Galán, J. L., Monedero, V., Pérez-Martínez, G. (2005). Pleiotropic effects of lactate dehydrogenase inactivation in *Lactobacillus casei*. *Research in Microbiology*, 156(5–6), 641–649. <https://doi.org/10.1016/j.resmic.2005.02.011>
59. Rico, J., Yebra, M. J., Pérez-Martínez, G., Deutscher, J., Monedero, V. (2008). Analysis of *ldh* genes in *Lactobacillus casei* BL23: Role on lactic acid production. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, 35(6), 579–586. <https://doi.org/10.1007/s10295-008-0319-8>
60. Malleret, C., Lauret, R., Ehrlich, S. D., Morel-Deville, F., Zagorec, M. (1998). Disruption of the sole *ldhL* gene in *Lactobacillus sakei* prevents the production of both L- and D-lactate. *Microbiology*, 144(Pt 12), 3327–3333. <https://doi.org/10.1099/00221287-144-12-3327>
61. Tatum, E. L., Peterson, W. H., Fred, E. B. (1936). Enzymic racemization of optically active lactic acid. *Biochemical Journal*, 30(10), 1892–1897. <https://doi.org/10.1042/bj0301892>
62. Stetter, K. O., Kandler, O. (1973). Formation of DL-lactic acid by lactobacilli and characterization of a lactic acid racemase from several streptobacteria (author's transl). *Archiv Fur Mikrobiologie*, 94(3), 221–247. (In German)
63. Goffin, P., Deghorain, M., Mainardi, J.-L., Tytgat, I., Champomier-Vergès, M.-C., Kleerebezem, M. et al. (2005). Lactate racemization as a rescue pathway for supplying d-lactate to the cell wall biosynthesis machinery in *Lactobacillus plantarum*. *Journal of Bacteriology*, 187(19), 6750–6761. <https://doi.org/10.1128/JB.187.19.6750-6761.2005>
64. Ferain, T., Garmyn, D., Bernard, N., Hols, P., Delcour, J. (1994). *Lactobacillus plantarum* *ldhL* gene: Overexpression and deletion. *Journal of Bacteriology*, 176(3), 596–601. <https://doi.org/10.1128/jb.176.3.596-601.1994>
65. Ferain, T., Hobbs, J. N., Richardson, J., Bernard, N., Garmyn, D., Hols, P. et al. (1996). Knockout of the two *ldh* genes has a major impact on peptidoglycan precursor synthesis in *Lactobacillus plantarum*. *Journal of Bacteriology*, 178(18), 5431–5437. <https://doi.org/10.1128/jb.178.18.5431-5437.1996>
66. Billot-Klein, D., Gutmann, L., Sablé, S., Guittet, E., van Heijenoort, J. (1994). Modification of peptidoglycan precursors is a common feature of the low-level vancomycin-resistant VANB-type *Enterococcus* D366 and of the naturally glycopeptide-resistant species *Lactobacillus casei*, *Pediococcus pentosaceus*, *Leuconostoc mesenteroides*, and *Enterococcus gallinarum*. *Journal of Bacteriology*, 176(8), 2398–2405. <https://doi.org/10.1128/jb.176.8.2398-2405.1994>
67. Handwerger, S., Pucci, M. J., Volk, K. J., Liu, J., Lee, M. S. (1994). Vancomycin-resistant *Leuconostoc mesenteroides* and *Lactobacillus casei* synthesize cytoplasmic peptidoglycan precursors that terminate in lactate. *Journal of Bacteriology*, 176(1), 260–264. <https://doi.org/10.1128/jb.176.1.260-264.1994>
68. Nagar, M., Narmandakh, A., Khalak, Y., Bearse, S. L. (2011). Redefining the minimal substrate tolerance of mandelate racemase. Racemization of trifluorolactate. *Biochemistry*, 50(41), 8846–8852. <https://doi.org/10.1021/bi201188j>
69. Cava, F., Lam, H., de Pedro, M. A., Waldor, M. K. (2011). Emerging knowledge of regulatory roles of D-amino acids in bacteria. *Cellular and Molecular Life Sciences*, 68(5), 817–831. <https://doi.org/10.1007/s00018-010-0571-8>
70. Richard, J. P., Amyes, T. L. (2004). On the importance of being zwitterionic: Enzymatic catalysis of decarboxylation and deprotonation of cationic carbon. *Bioorganic Chemistry*, 32(5), 354–366. <https://doi.org/10.1016/j.bioorg.2004.05.002>
71. Desguin, B., Goffin, P., Viaene, E., Kleerebezem, M., Martin-Diaconescu, V., Maroney, M. J. et al. (2014). Lactate racemase is a nickel-dependent enzyme activated by a widespread maturation system. *Nature Communications*, 5(1), Article 3615. <https://doi.org/10.1038/ncomms4615>
72. Desguin, B., Soumillion, P., Hausinger, R. P., Hols, P. (2017). Unexpected complexity in the lactate racemization system of lactic acid bacteria. *FEMS Microbiology Reviews*, 41 (Suppl. 1), 71–83. <https://doi.org/10.1093/femsre/fux021>
73. Bienert, G. P., Desguin, B., Chaumont, F., Hols, P. (2013). Channel-mediated lactic acid transport: A novel function for aquaglyceroporins in bacteria. *The Biochemical Journal*, 454(3), 559–570. <https://doi.org/10.1042/bj20130388>
74. Kant, R., Blom, J., Palva, A., Siezen, R. J., de Vos, W. M. (2011). Comparative genomics of *Lactobacillus*. *Microbial biotechnology*, 4(5), 323–332. <https://doi.org/10.1111/j.1751-7915.2010.00215.x>
75. Titgemeyer, F., Hillen, W. (2002). Global control of sugar metabolism: A Gram-positive solution. *Antonie van Leeuwenhoek*, 82(1), 59–71. <https://doi.org/10.1023/A:1020628909429>
76. Iskandar, C. F., Cailliez-Grimal, C., Borges, F., Revol-Junelles, A.-M. (2019). Review of lactose and galactose metabolism in Lactic Acid Bacteria dedicated to expert genomic annotation. *Trends in Food Science and Technology*, 88, 121–132. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.03.020>
77. Galinier, A., Deutscher, J. (2017). Sophisticated regulation of transcriptional factors by the bacterial phosphoenolpyruvate: Sugar phosphotransferase system. *Journal of Molecular Biology*, 429(6), 773–789. <https://doi.org/10.1016/j.jmb.2017.02.006>
78. Deutscher, J., Francke, C., Postma, P. W. (2006). How phosphotransferase system-related protein phosphorylation regulates carbohydrate metabolism in bacteria. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, 70(4), Article 939. <https://doi.org/10.1128/mmb.00024-06>
79. Wu, Y., Yang, Y., Ren, C., Yang, C., Yang, S., Gu, Y. et al. (2015). Molecular modulation of pleiotropic regulator CcpA for glucose and xylose cointilization by solvent-producing *Clostridium acetobutylicum*. *Metabolic Engineering*, 28, 169–179. <https://doi.org/10.1016/j.ymben.2015.01.006>
80. Marciniak, B. C., Pabijaniak, M., de Jong, A., Dühring, R., Seidel, G., Hillen, W. et al. (2012). High- and low-affinity cre boxes for CcpA binding in *Bacillus subtilis* revealed by genome-wide analysis. *BMC Genomics*, 13(1), Article 401. <https://doi.org/10.1186/1471-2164-13-401>
81. Barrangou, R., Azcarate-Peril, M. A., Duong, T., Connors, S. B., Kelly, R. M., Klauenhammer, T. R. (2006). Global analysis of carbohydrate utilization by *Lactobacillus acidophilus* using cDNA microarrays. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 103(10), 3816–3821. <https://doi.org/10.1073/pnas.0511287103>
82. Li, C., Sun, J. W., Zhang, G. F., Liu, L. B. (2016). Effect of the absence of the *CcpA* gene on growth, metabolic production, and stress tolerance in *Lactobacillus delbrueckii* ssp. *Bulgaricus*. *Journal of Dairy Science*, 99(1), 104–111. <https://doi.org/10.3168/jds.2015-10321>
83. Zotta, T., Ricciardi, A., Guidone, A., Sacco, M., Muscarello, L., Mazzeo, M. F. et al. (2012). Inactivation of *ccpA* and aeration affect growth, metabolite production and stress tolerance in *Lactobacillus plantarum* WCFS1. *International Journal of Food Microbiology*, 155(1–2), 51–59. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2012.01.017>
84. Chen, C., Lu, Y., Wang, L., Yu, H., Tian, H. (2018). CcpA-dependent carbon catabolite repression regulates fructooligosaccharides metabolism in *Lactobacillus plantarum*. *Frontiers in Microbiology*, 9, Article 1114. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.01114>
85. Bekal, S., Diviès, C., Prévost, H. (1998). Citrate lyases of lactic acid bacteria. *Le Lait*, 78(1), 3–10. <https://doi.org/10.1051/laic:199811>
86. García-Quintás, N., Blancato, V., Repizo, G., Magni, C., López, P. (2008). Citrate metabolism and aroma compound production in lactic acid bacteria. Chapter in the book: *Molecular Aspects of Lactic Acid Bacteria for Traditional and New Applications*. Kerala, India: Research Signpost, 2008.
87. Martin, M. G., Magni, C., de Mendoza, D., López, P. (2005). CitI, a transcription factor involved in regulation of citrate metabolism in lactic acid bacteria. *Journal of Bacteriology*, 187(15), 5146–5155. <https://doi.org/10.1128/JB.187.15.5146-5155.2005>
88. Mortera, P., Pudlik, A., Magni, C., Alarcón, S., Lolkema, J. S. (2013). Ca²⁺-citrate uptake and metabolism in *Lactobacillus casei* ATCC334. *Applied and Environmental Microbiology*, 79(15), 4603–4612. <https://doi.org/10.1128/AEM.00925-13>
89. Drider, D., Bekal, S., Prévost, H. (2004). Genetic organization and expression of citrate permease in lactic acid bacteria. *Genetics and Molecular Research*, 3(2), 273–281.
90. Yang, X., Zhao, L., Chen, Q., Wang, N., Shi, K., Liu, S. (2022). Functional verification of the citrate transporter gene in a wine lactic acid bacterium, *Lactiplantibacillus plantarum*. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 10, Article 894870. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2022.894870>
91. Guo, T., Zhang, L., Xin, Y., Xu, Z., He, H., Kong, J. (2017). Oxygen-Inducible conversion of lactate to acetate in heterofermentative *Lactobacillus brevis* ATCC367. *Applied and Environmental Microbiology*, 83(21), Article e01659–17. <https://doi.org/10.1128/AEM.01659-17>
92. Abbe, K., Takahashi, S., Yamada, T. (1982). Involvement of oxygen-sensitive pyruvate formate-lyase in mixed-acid fermentation by *Streptococcus mutans* under strictly anaerobic conditions. *Journal of Bacteriology*, 152(1), 175–182. <https://doi.org/10.1128/jb.152.1.175-182.1982>

93. Ianniello, R. G., Zheng, J., Zotta, T., Ricciardi, A., Gänzle, M. G. (2015). Biochemical analysis of respiratory metabolism in the heterofermentative *Lactobacillus spicheri* and *Lactobacillus reuteri*. *Journal of Applied Microbiology*, 119(3), 763–775. <https://doi.org/10.1111/jam.12853>
94. Broadbent, J. R., Larsen, R. L., Deibel, V., Steele, J. L. (2010). Physiological and transcriptional response of *Lactobacillus casei* ATCC334 to acid stress. *Journal of Bacteriology*, 192(9), 2445–2458. <https://doi.org/10.1128/JB.01618-09>
95. Hamon, E., Horvatovich, P., Marchioni, E., Aoudé-Werner, D., Ennahar, S. (2014). Investigation of potential markers of acid resistance in *Lactobacillus plantarum* by comparative proteomics. *Journal of Applied Microbiology*, 116(1), 134–144. <https://doi.org/10.1111/jam.12339>
96. Hernandez-Hernandez, O., Muthaiyan, A., Moreno, F. J., Montilla, A., Sanz, M. L., Ricke, S. C. (2012). Effect of prebiotic carbohydrates on the growth and tolerance of *Lactobacillus*. *Food Microbiology*, 30(2), 355–361. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2011.12.022>
97. Teixeira, J. S., Seeras, A., Sanchez-Maldonado, A. F., Zhang, C., Su, M. S.-W., Gänzle, M. G. (2014). Glutamine, glutamate, and arginine-based acid resistance in *Lactobacillus reuteri*. *Food Microbiology*, 42, 172–180. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2014.03.015>
98. Kullen, M. J., Klaenhammer, T. R. (1999). Identification of the pH-inducible, proton-translocating F1F0-ATPase (atpBEFHGDC) operon of *Lactobacillus acidophilus* by differential display: Gene structure, cloning and characterization. *Molecular Microbiology*, 33(6), 1152–1161. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2958.1999.01557.x>
99. Azcarate-Peril, M. A., Altermann, E., Hoover-Fitzula, R. L., Cano, R. J., Klaenhammer, T. R. (2004). Identification and inactivation of genetic loci involved with *Lactobacillus acidophilus* acid tolerance. *Applied and Environmental Microbiology*, 70(9), 5315–5322. <https://doi.org/10.1128/AEM.70.9.5315-5322.2004>
100. Nomura, M., Nakajima, I., Fujita, Y., Kobayashi, M., Kimoto, H., Suzuki, I. et al. (1999). *Lactococcus lactis* contains only one glutamate decarboxylase gene. *Microbiology*, (6), 1375–1380. <https://doi.org/10.1099/13500872-145-6-1375>
101. Lorca, G. L., de Valdez, G. F., Ljungh, A. (2002). Characterization of the protein-synthesis dependent adaptive acid tolerance response in *Lactobacillus acidophilus*. *Journal of Molecular Microbiology and Biotechnology*, 4(6), 525–532.
102. Wang, R.-M., Li, N., Zheng, K., Hao, J.-F. (2018). Enhancing acid tolerance of the probiotic bacterium *Lactobacillus acidophilus* NCFM with trehalose. *FEMS Microbiology Letters*, 365(19), Article fny217. <https://doi.org/10.1093/femsle/fny217>
103. Guo, Y., Tian, X., Huang, R., Tao, X., Shah, N. P., Wei, H. et al. (2017). A physiological comparative study of acid tolerance of *Lactobacillus plantarum* ZDY2013 and *L. plantarum* ATCC8014 at membrane and cytoplasm levels. *Annals of Microbiology*, 67(10), 669–677. <https://doi.org/10.1007/s13213-017-1295-x>
104. Jang, H.-Y., Kim, M. J., Bae, M., Hwang, I. M., Lee, J.-H. (2023). Transcriptional analysis of the molecular mechanism underlying the response of *Lactiplantibacillus plantarum* to lactic acid stress conditions. *Heliyon*, 9(6), Article e16520. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16520>
105. Andrea, K., Oliveira, J. A. R. de, Martins, L. H. da S., Maciel, M. R. W., Filho, R. M. (2017). Lactic acid production to purification: A review. *BioResources*, 12(2), 4364–4383. <https://doi.org/10.15376/biores.12.2.komesu>
106. Zhou, A., Cao, Y., Zhou, D., Hu, S., Tan, W., Xiao, X. et al. (2020). Global transcriptomic analysis of *Cronobacter sakazakii* CICC21544 by RNA-seq under inorganic acid and organic acid stresses. *Food Research International*, 130, Article 108963. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2019.108963>
107. Zhou, C., Fey, P. D. (2020). The acid response network of *Staphylococcus aureus*. *Current Opinion in Microbiology*, 55, 67–73. <https://doi.org/10.1016/j.mib.2020.03.006>
108. Tran, V. G., Zhao, H. (2022). Engineering robust microorganisms for organic acid production. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, 49(2), Article kuab067. <https://doi.org/10.1093/jimb/kuab067>
109. King, T., Lucchini, S., Hinton, J. C. D., Gobius, K. (2010). Transcriptomic analysis of *Escherichia coli* O157: H7 and K-12 cultures exposed to inorganic and organic acids in stationary phase reveals acidulant- and strain-specific acid tolerance responses. *Applied and Environmental Microbiology*, 76(19), 6514–6528. <https://doi.org/10.1128/AEM.02392-09>
110. Li, M., Carpenter, C. E., Broadbent, J. R. (2021). Organic acid exposure enhances virulence in some *Listeria monocytogenes* strains using the *Galleria mellonella* infection model. *Frontiers in Microbiology*, 12, Article 675241. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.675241>
111. Rode, T. M., Møretro, T., Langsrud, S., Langsrud, O., Vogt, G., Holck, A. (2010). Responses of *Staphylococcus aureus* exposed to HCl and Envinic acid stress. *Canadian Journal of Microbiology*, 56(9), 777–792. <https://doi.org/10.1139/w10-057>
112. Ueno, Y., Hayakawa, K., Takahashi, S., Oda, K. (1997). Purification and characterization of glutamate decarboxylase from *Lactobacillus brevis* IFO 12005. *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*, 61(7), 1168–1171. <https://doi.org/10.1271/bbb.61.1168>
113. Li, W., Yang, L., Nan, W., Lu, J., Zhang, S., Ujiroghene, O. J. et al. (2020). Whole-genome sequencing and genomic-based acid tolerance mechanisms of *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *Bulgaricus* LJ1. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 104(17), 7631–7642. <https://doi.org/10.1007/s00253-020-10788-5>
114. Liguori, R., Soccol, C. R., Vandenbergh, L. P. D. S., Woiciechowski, A. L., Ionata, E., Marcolongo, L. et al. (2015). Selection of the strain *Lactobacillus acidophilus* ATCC43121 and its application to brewers' spent grain conversion into lactic acid. *BioMed Research International*, 2015(1), Article 240231. <https://doi.org/10.1155/2015/240231>
115. Zhao, R., Sun, J., Mo, H., Zhu, Y. (2007). Analysis of functional properties of *Lactobacillus acidophilus*. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 23(2), 195–200. <https://doi.org/10.1007/s11274-006-9209-2>
116. Phan, P. (2011). Kinetic investigation in lactic acid production by *L. Acidophilus* (SSRN Scholarly Paper No. 2195809). Social Science Research Network. <https://doi.org/10.2139/ssrn.2195809>
117. Thakur, A., Panesar, P. S., Saini, M. S. (2018). Parametric optimization of lactic acid production by immobilized *Lactobacillus casei* using box-behnken design. *Periodica Polytechnica Chemical Engineering*, 62(3), 274–285. <https://doi.org/10.3311/PPch.11403>
118. Costa, S., Summa, D., Radice, M., Vertuani, S., Manfredini, S., Tamburini, E. (2024). Lactic acid production by *Lactobacillus casei* using a sequence of seasonally available fruit wastes as sustainable carbon sources. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 12, Article 1447278. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2024.1447278>
119. Stephen, J. M., Saleh, A. M. (2025). Strategic choices in bioprocessing of L(+) Lactic acid: Homo-fermentative *Lactobacilli* monocultures with novel agro-residue combination enhances economic production. *Heliyon*, 11(1), Article e41532. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e41532>
120. Tu, W.-L., Hsu, T.-C., Wang, C.-A., Guo, G.-L., Chao, Y. (2019). Using novel *Lactobacillus plantarum* to produce lactic acid from lignocellulosic biomass in an integrated simultaneous saccharification and fermentation process. *BioResources*, 14(2), 3873–3885. <https://doi.org/10.15376/biores.14.2.3873-3885>
121. Senedese, A. L. C., Maciel Filho, R., Maciel, M. R. W. (2015). L-Lactic Acid Production by *Lactobacillus rhamnosus* ATCC10863. *The Scientific World Journal*, 2015(1), Article 501029. <https://doi.org/10.1155/2015/501029>
122. Kyliä-Nikkilä, K., Hujanen, M., Leisola, M., Palva, A. (2000). Metabolic engineering of *Lactobacillus helveticus* CNRZ32 for production of pure L-(+)-lactic acid. *Applied and Environmental Microbiology*, 66(9), 3835–3841. <https://doi.org/10.1128/AEM.66.9.3835-3841.2000>
123. Zhang, Y., Vadlani, P. V. (2015). Lactic acid production from biomass-derived sugars via co-fermentation of *Lactobacillus brevis* and *Lactobacillus plantarum*. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 119(6), 694–699. <https://doi.org/10.1016/j.jbiosc.2014.10.027>
124. Homma, H., Funaoka, Y., Kazuoka, T., Tokuda, H., Nakanishi, K. (2021). Preparation of high-optical-purity l-lactic acid from dl-lactate using optical isomer preferential lactic acid assimilating microorganisms. *Food Preservation Science*, 47(3), 153–159. <https://doi.org/10.5891/jafps.47.153>
125. Hu, C., Zhang, Y., Pang, X., Chen, X. (2024). Poly(Lactic Acid): Recent stereochemical advances and new materials engineering. *Advanced Materials*, 37(22), Article 2412185. <https://doi.org/10.1002/adma.202412185>
126. Bruno-Bárcena, J. M., Ragout, A. L., Córdoba, P. R., Siñeriz, F. (1999). Continuous production of l(+)-lactic acid by *Lactobacillus casei* in two-stage systems. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 51(3), 316–324. <https://doi.org/10.1007/s002530051397>
127. Farrokhi, A., Ehsani, M. R., Moayednia, N., Azizi Nezhad, R. (2018). Lactic acid fermentation of synbiotic cream: Effects on physicochemical characteristics and formation of L (+), and D (–) lactic acid isomers. *Applied Ecology and Environmental Research*, 16(6), 7447–7466. <https://doi.org/10.15666/aer/1606.74477466>
128. Bernardo, M. P., Coelho, L. F., de Lima, C. J. B., de Melo Rodovalho, C., de Oliveira, P. M., de Paula, F. C. et al. (2013). Isolation and characterization of bacterial producers of optically pure D(–) and L(+) lactic acid. *African Journal of Microbiology Research*, 7(21), 2618–2628. <https://doi.org/10.5897/AJMR2013.5388>
129. Wang, T., Liu, L., Li, P., Deng, T., Yue, S., Nie, J. et al. (2025). Optimization of fermentation conditions for production of D-lactic acid with high optical purity by *Lactobacillus delbrueckii* HB49–2. *Zhongguo Niangzao*, 44(3), 203–207. <https://doi.org/10.11882/j.issn.0254-5071.2025.03.030>
130. Tashiro, Y., Kaneko, W., Sun, Y., Shibata, K., Inokuma, K., Zendo, T. et al. (2011). Continuous D-lactic acid production by a novel thermotolerant *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *lactis* QU41. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 89(6), 1741–1750. <https://doi.org/10.1007/s00253-010-3011-7>
131. Srivastava, A. K., Tripathi, A. D., Jha, A., Poonia, A., Sharma, N. (2015). Production, optimization and characterization of lactic acid by *Lactobacillus delbrueckii* NCIM 2025 from utilizing agro-industrial byproduct (cane molasses). *Journal of Food Science and Technology*, 52(6), 3571–3578. <https://doi.org/10.1007/s13197-014-1423-6>
132. Beitel, S. M., Coelho, L. F., Contiero, J. (2020). Efficient conversion of agroindustrial waste into D(–) lactic acid by *Lactobacillus delbrueckii* using fed-batch fermentation. *BioMed Research International*, 2020, Article 4194052. <https://doi.org/10.1155/2020/4194052>
133. Karnaouri, A., Asimakopoulou, G., Kalogiannis, K. G., Lappas, A., Topakas, E. (2020). Efficient d-lactic acid production by *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *Bulgaricus* through conversion of organosolv pretreated lignocellulosic biomass. *Biomass and Bioenergy*, 140, Article 105672. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105672>
134. Hao, P., Zheng, H., Yu, Y., Ding, G., Gu, W., Chen, S. et al. (2011). Complete sequencing and pan-genomic analysis of *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *bulgaricus* reveal its genetic basis for industrial yogurt production. *PLoS One*, 6(1), Article e15964. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0015964>
135. Song, Y., Zhao, J., Liu, W., Li, W., Sun, Z., Cui, Y. et al. (2021). Exploring the industrial potential of *Lactobacillus delbrueckii* ssp. *bulgaricus* by population genomics and genome-wide association study analysis. *Journal of Dairy Science*, 104(4), 4044–4055. <https://doi.org/10.3168/jds.2020-19467>
136. Gao, H., Li, X., Chen, X., Hai, D., Wei, C., Zhang, L. et al. (2022). The functional roles of *Lactobacillus acidophilus* in different physiological and pathological processes. *Journal of Microbiology and Biotechnology*, 32(10), 1226–1233. <https://doi.org/10.4014/jmb.2205.05041>
137. Schmitt, J. D., de Fariña, L. O., Simões, M., Kottwitz, L. B. M. (2018). Evaluation of the probiotic profile of the *Lactobacillus acidophilus* used in pharmaceutical and food applications. *Acta Scientiarum. Health Sciences*, 40, Article 36664. <https://doi.org/10.4025/actascihealthsci.v40i1.36664>
138. Buriti, F. C. A., Saad, S. M. I. (2007). Bacteria of *Lactobacillus casei* group: Characterization, viability as probiotic in food products and their importance for human health. *Archivos Latinoamericanos De Nutricion*, 57(4), 373–380. (In Portuguese)
139. Hosseini Nezhad, M., Hussain, M. A., Britz, M. L. (2015). Stress responses in probiotic *Lactobacillus casei*. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 55(6), 740–749. <https://doi.org/10.1080/10408398.2012.675601>

140. Arakawa, K., Kawai, Y., Fujitani, K., Nishimura, J., Kitazawa, H., Komine, K. -i. et al. (2008). Bacteriocin production of probiotic *Lactobacillus gasseri* LA39 isolated from human feces in milk-based media. *Animal Science Journal*, 79(5), 634–640. <https://doi.org/10.1111/j.1740-0929.2008.00574.x>

141. Daliu, P., Souto, E. B., Santini, A. (2025). Novel applications of *Lactobacillus* in the food industry. *Journal of Asian Scientific Research*, 15(1), 111–121. <https://doi.org/10.55493/5003.v15i1.5333>

142. Anumudu, C. K., Miri, T., Onyeaka, H. (2024). Multifunctional applications of lactic acid bacteria: Enhancing safety, quality, and nutritional value in foods and fermented beverages. *Foods*, 13(23), Article 3714. <https://doi.org/10.3390/foods13233714>

143. Shah, A. B., Baiseitova, A., Zahoor, M., Ahmad, I., Ikram, M., Bakhsh, A. et al. M. (2024). Probiotic significance of *Lactobacillus* strains: A comprehensive review on health impacts, research gaps, and future prospects. *Gut Microbes*, 16(1), Article 2431643. <https://doi.org/10.1080/19490976.2024.2431643>

144. Liu, R. (2024). A promising area of research in medicine: Recent advances in properties and applications of *Lactobacillus*-derived exosomes. *Frontiers in Microbiology*, 15, Article 1266510. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1266510>

145. Baral, K. C., Bajracharya, R., Lee, S. H., Han, H.-K. (2021). Advancements in the pharmaceutical applications of probiotics: Dosage forms and formulation technology. *International Journal of Nanomedicine*, 16, 7535–7556. <https://doi.org/10.2147/IJN.S337427>

146. Spangler, J. R., Caruana, J. C., Medintz, I. L., Walper, S. A. (2021). Harnessing the potential of *Lactobacillus* species for therapeutic delivery at the luminal-mucosal interface. *Future Science OA*, 7(4), Article FSO671. <https://doi.org/10.2144/fsoa-2020-0153>

147. Bron, P. A., Kleerebezem, M. (2018). Lactic acid bacteria for delivery of endogenous or engineered therapeutic molecules. *Frontiers in Microbiology*, 9, Article 1821. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.01821>

148. Mu, Y., Zhang, C., Li, T., Jin, F.-J., Sung, Y.-J., Oh, H.-M. et al. (2022). Development and applications of CRISPR/Cas9-based genome editing in *Lactobacillus*. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(21), Article 12852. <https://doi.org/10.3390/ijms232112852>

149. Papagianni, M. (2012). Metabolic engineering of lactic acid bacteria for the production of industrially important compounds. *Computational and Structural Biotechnology Journal*, 3(4), Article e201210003. <https://doi.org/10.5936/csbj.201210003>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ	AUTHOR INFORMATION
Принадлежность к организации	Affiliation
Беленко Андрей Александрович — кандидат биологических наук, ведущий лабораторией генетических исследований (филиал), Федеральный научный центр пищевых систем им. В. М. Горбатова РАН 191014, Россия, г. Санкт-Петербург, Литейный пр., 55 E-mail: a.belenko@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0009-0007-1914-2972 * автор для контактов	Andrey A. Belenko , Candidate of Biological Sciences, Head of the Laboratory of Genetic Research (the Branch), V. M. Gorbatov Federal Scientific Center for Food Systems of the Russian Academy of Sciences 55, Liteiny prospect, 191014, Saint Petersburg, Russia E-mail: a.belenko@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0009-0007-1914-2972 * corresponding author
Путилов Владислав Эдуардович — лаборант-исследователь, Лаборатория биотехнологии и биоинженерии (филиал), Федеральный научный центр пищевых систем им. В. М. Горбатова РАН 191014, Россия, г. Санкт-Петербург, Литейный пр., 55 E-mail: vladislav.e.putilov@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0009-0004-8138-4727	Vladislav E. Putilov , Research Assistant, Laboratory of Biotechnology and Bioengineering (the Branch), V. M. Gorbatov Federal Scientific Center for Food Systems of the Russian Academy of Sciences 55, Liteiny prospect, 191014, Saint Petersburg, Russia E-mail: vladislav.e.putilov@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0009-0004-8138-4727
Непомнящий Анатолий Павлович — научный сотрудник, Лаборатория биотехнологии и биоинженерии (филиал), Федеральный научный центр пищевых систем им. В. М. Горбатова РАН 191014, Россия, г. Санкт-Петербург, Литейный пр., 55 E-mail: nepomnyashiy.95@mail.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0088-2704	Anatoliy P. Nepomnyashchiy , Research Scientist, Laboratory of Biotechnology and Bioengineering (the Branch), V. M. Gorbatov Federal Scientific Center for Food Systems of the Russian Academy of Sciences 55, Liteiny prospect, 191014, Saint Petersburg, Russia E-mail: nepomnyashiy.95@mail.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0088-2704
Причепа Артем Олегович — младший научный сотрудник, Лаборатория биотехнологии и биоинженерии (филиал), Федеральный научный центр пищевых систем им. В. М. Горбатова РАН 191014, Россия, г. Санкт-Петербург, Литейный пр., 55 E-mail: prichepa.a@yandex.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1037-5629 * автор для контактов	Artem O. Prichepa , Junior Research Scientist, Laboratory of Biotechnology and Bioengineering (the Branch), V. M. Gorbatov Federal Scientific Center for Food Systems of the Russian Academy of Sciences 55, Liteiny prospect, 191014, Saint Petersburg, Russia E-mail: prichepa.a@yandex.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1037-5629 * corresponding author
Семенова Анастасия Артуровна — доктор технических наук, заместитель директора по научной работе, Федеральный научный центр пищевых систем им. В. М. Горбатова РАН 109316, Москва, ул. Талалихина, 26 E-mail: a.semenova@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4372-6448	Anastasia A. Semenova , Doctor of Technical Sciences, Deputy Director for Scientific Work, V. M. Gorbatov Federal Scientific Center for Food Systems of the Russian Academy of Sciences 26, Talalikhin str., Moscow, 109316, Russia E-mail: a.semenova@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4372-6448
Ситнов Вениамин Юрьевич — директор филиала, Федеральный научный центр пищевых систем им. В. М. Горбатова РАН 191014, Россия, г. Санкт-Петербург, Литейный пр., 55 E-mail: v.sitnov@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1927-1997	Veniamin Yu. Sitnov , Director the Branch, V. M. Gorbatov Federal Scientific Center for Food Systems of the Russian Academy of Sciences 55, Liteiny prospect, 191014, Saint Petersburg, Russia E-mail: v.sitnov@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1927-1997
Сорокина Нинель Петровна — кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, отдел микробиологии (филиал), Федеральный научный центр пищевых систем им. В. М. Горбатова РАН 152613, Ярославская область, Углич, ул. Красноармейский бульвар, 19 E-mail: n.sorokina@fncps.ru ORCID: http://orcid.org/0000-0002-1108-3695	Ninel P. Sorokina , Candidate of Technical Sciences, Leading Researcher, Department of Microbiology (the Branch), V. M. Gorbatov Federal Scientific Center for Food Systems of the Russian Academy of Sciences 19, Krasnoarmeysky Boulevard, Uglich, 152613, Yaroslavl Region, Russia E-mail: n.sorokina@fncps.ru ORCID: http://orcid.org/0000-0002-1108-3695
Критерии авторства	Contribution
Беленко А. А. — разработка идеи и дизайна статьи, проведение информационных исследований, наполнение разделов, систематизация результатов, корректировка и редакция; Путилов В. Э. — проведение информационных исследований, наполнение разделов; Непомнящий А. П. — проведение информационных исследований, наполнение разделов; Причепа А. О. — проведение информационных исследований, наполнение разделов, оформление для публикации; Семенова А. А. — общая консультация, корректура; Ситнов В. Ю. — общая консультация, рекомендации по теме, корректура; Сорокина Н. П. — общая консультация, корректура	Belenko A. A. — article idea and design, conducting information research, filling sections, systematizing results, correction and editing; Putilov V. E. — conducting information research, filling out sections; Nepomnyashchiy A. P. — conducting information research, filling out sections; Prichepa A. O. — conducting information research, filling out sections, and preparing for publication; Semenova A. A. — general consultation, recommendations on the topic, proofreading Sitnov V. Yu. — general consultation, recommendations on the topic, proofreading; Sorokina N. P. — general consultation, proofreading
Конфликт интересов	Conflict of interest
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.	The authors declare no conflict of interest.

DOI: <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-4-555-565>

Received 17.06.2025

Accepted in revised 25.11.2025

Accepted for publication 27.11.2025

© Juliana A., Maruddin F., Hatta W., 2025

Available online at <https://www.fsjour.com/jour>

Review article

Open access

PURPLE SWEET POTATO AS A NATURAL STABILIZER IN DAIRY PRODUCTS

Andi Juliana, Fatma Maruddin*, Wahniyathi Hatta

Faculty of Animal Science, Hasanuddin University, Makassar, Indonesia

KEYWORDS:

dairy products, flour, natural stabilizer, sweet potato

ABSTRACT

Consumer interest in high-quality food is growing, especially in functional products. Milk and dairy products are high-nutrient sources that are often enriched with additives to enhance their bioactivity. However, dairy products such as yogurt can be prone to defects, including syneresis. The main components of yogurt, including protein (*casein and whey*), carbohydrates (*lactose*), milk fat, calcium, and lactic acid, play a crucial role in the formation and stability of the gel structure. Processing factors, such as heat treatment, temperature, and duration of storage, also affect the physical stability of the product. Generally, additives are used to maintain quality and sensory characteristics, but overconsumption of food with synthetic additives can negatively affect health. Therefore, the use of natural ingredients needs to be developed. Purple sweet potato flour is a natural ingredient that can serve as a stabilizer due to its high starch content. Starch has been widely used as a thickener, stabilizer, and gel former. In addition to starch, purple sweet potato flour contains anthocyanins that can increase the added value of the final product. This article aims to examine the potential use of the purple sweet potato as a nutrient-rich natural stabilizer.

Поступила 17.06.2025

Поступила после рецензирования 25.11.2025

Принята в печать 27.11.2025

© Джулиана А., Маруддин Ф., Хатта В., 2025

<https://www.fsjour.com/jour>

Обзорная статья

Открытый доступ

ФИОЛЕТОВЫЙ БАТАТ В КАЧЕСТВЕ НАТУРАЛЬНОГО СТАБИЛИЗАТОРА В МОЛОЧНЫХ ПРОДУКТАХ

Джулиана А., Маруддин Ф., Хатта В.

Факультет зоотехнии, Университет Хасануддина, Макаassar, Индонезия

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: АННОТАЦИЯ

молочные продукты, мука, натуральный стабилизатор, батат

Интерес потребителей к высококачественным продуктам питания, в особенности к функциональным, продолжает возрастать. Молоко и молочные продукты являются богатыми источниками питательных веществ, которые часто обогащают добавками для повышения их биологической активности. Однако молочные продукты, такие как йогурт, могут быть подвержены возникновению пороков, в том числе синерезису. Основные компоненты йогурта, включая белок (казеин и сывороточные белки), углеводы (лактозу), молочный жир, кальций, и молочную кислоту, играют важную роль в формировании стабильности гелевой структуры. Технологические факторы, такие как режимы тепловой обработки, температура и продолжительность хранения, также влияют на стабильность физических параметров продукта. Как правило, для сохранения показателей качества и органолептических свойств используются добавки, но чрезмерное употребление продуктов с синтетическими добавками может негативно повлиять на здоровье. В связи с этим, необходимым является расширение ассортимента натуральных ингредиентов. Мука из фиолетового батата является натуральным ингредиентом, который может использоваться в качестве стабилизатора благодаря высокому содержанию крахмала. Крахмал широко используется в качестве загустителя, стабилизатора и гелеобразователя. Помимо крахмала, мука из фиолетового батата содержит антоцианы, что позволит характеризовать готовый продукт с ее содержанием, как продукт с добавленной пользой. Цель данной статьи — изучить перспективы применения фиолетового батата в качестве натурального стабилизатора.

1. Introduction

The development of the food industry today isn't focused solely on the taste and appearance of the product. Additionally, it offers functional added value that can provide health benefits to consumers. Consumer interest in high-quality food, especially in functional products, is increasing. Promotions on food quality and healthy lifestyles attract consumers' attention [1]. In general, functional foods can be produced from either natural or processed ingredients. Regular consumption of functional foods can provide health benefits [2,3].

The consumption of products with bioactive components is associated with a reduced risk of diseases, such as tumors, obesity, and metabolic syndrome [1]. Bioactive compounds, including carotenoids, anthocyanins, and phenolic compounds, can be found in sweet potato [3,4]. Purple sweet potato (*Ipomoea batatas*) is a type of tuber that can contribute to health due to its antioxidant, anti-obesity, hepatoprotective, antimicrobial, and other properties. The sweet potato can provide food products with color and flavor, while also increasing their nutritional value [5]. In 2018, purple sweet potato production reached 2 million tons. Sweet potato prices are relatively

higher, especially when processed into a product. Purple sweet potato has good potential for wider use in the food industry [6].

Milk and dairy products are highly nutritious, providing protein and energy [7]. Nutritionists consider dairy products to be beneficial for human health. This is due to their high nutritional value and digestibility [8]. The composition of dairy products such as yogurt and ice cream can be modified and enriched with bioactive compounds [9]. Natural ingredients such as fruits and vegetables are often added. These additives can affect the quality of the final product (e.g., sensory properties such as taste, appearance, and aroma) [10,11,12]. The development of new food products is essential to meet consumer needs [13].

Yuliana et al. [14] stated that dairy products such as yogurt with fruit ingredients, for example, banana, are often prone to physical changes in the form of syneresis. Syneresis in products can occur due to a decrease in the ability to bind water during storage and transportation. The formation of sediment in beverages is a significant issue both in terms of quality and cost, which can negatively impact consumer acceptance. The chemical composition of the ingredients influences turbidity and sedimentation.

FOR CITATION: Juliana, A., Maruddin, F., Hatta, W. (2025). Purple sweet potato as a natural stabilizer in dairy products. *Food Systems*, 8(4), 555–565. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-4-555-565>

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Джулиана, А., Маруддин, Ф., Хатта, В. (2025). Фиолетовый батат в качестве натурального стабилизатора в молочных продуктах. *Пищевые системы*, 8(4), 555–565. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-4-555-565>

Therefore, preventive measures should be focused on the chemical characteristics of each component [15]. The addition of stabilizers can prevent the instability of food products. Stabilizers are added to improve texture, mouthfeel, and appearance, and to reduce the risk of syneresis [8].

In general, food additives can be derived from natural or synthetic raw materials and used to improve food quality and extend shelf-life [16]. However, excessive use of artificial ingredients can potentially cause negative health effects, such as digestive disorders, allergies, and the risk of developing certain chronic diseases. Therefore, the use of safe natural additives with functional properties represents an important direction for meeting nutritional needs and increasing consumer acceptance of healthy beverages. This article aims to conduct a literature review of works that discuss the potential use of purple sweet potato flour as a natural stabilizer to improve the functional aspects of dairy products.

2. Objects and methods

A literature search was conducted using Scopus, ResearchGate, ScienceDirect, Springer, PubMed, and Google Scholar databases to ensure the inclusion of peer-reviewed research papers. The following keywords were used: dairy products, purple sweet potato flour, precipitation/syneresis, stabilizer, starch, and potential of purple sweet potato. The inclusion criteria focused on the issues related to the occurrence of syneresis in dairy products, the use of purple sweet potato (*Ipomoea batatas* L.) as a natural stabilizer, physicochemical properties, bioactive components, experimental studies, reviews, and laboratory analysis results related to physical stability (viscosity, syneresis, color, texture) in dairy products with added purple sweet potato flour. For this review, papers published no more than seven years ago were selected.

3. Milk and dairy products

Milk contains an animal protein that is important for meeting the nutritional needs of people. The essential amino acids in milk are highly digestible. Milk contains two main groups of nutrients, namely macronutrients and micronutrients [17]. Macronutrients are components found in large quantities in milk, including protein, fat, carbohydrates (primarily lactose), and water. Micronutrients consist of approximately 8–9 g/L of minerals, including Ca, P, Mg, Na, K, Fe, Se, and I. They also contain vitamins, lipophilic (A, D, E, and K) and hydrophilic ones (B vitamins and vitamin C), minerals, in various chemical forms, ions, organic salts, bound to proteins, and nucleic acids. In addition to the main nutritional composition of milk, there are various bioactive compounds, including peptides, probiotic bacteria, antioxidants, vitamins, specific proteins, oligosaccharides, organic acids, calcium with high absorption rates, conjugated linoleic acid, and other components, which can contribute to health [7,18–20]. The content of macro and micronutrients in milk from different animal species is presented in Tables 1 and 2.

The main minerals found in milk, such as Ca, Mg, K, Na, P, and Cl, are present in the form of mineral complexes and free ions. Such factors as pH, solids content, and temperature can affect the dynamic balance of these components. Additionally, the balance of minerals and casein content also has an impact. Soluble minerals in milk exist as free ions or bound to counter ions dispersed throughout the liquid phase. In contrast, insoluble minerals are mostly bound to casein micelles, such as calcium phosphate, which is also found within micelles. Milk also contains non-protein substances such as ions (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}) and anions (phosphate, citrate, and lactate). In addition, there are also metal-ion complexes and calcium phosphate, which are generally insoluble, as well as amino acids bound to proteins. These ions interact with milk proteins, especially casein, through electrostatic forces between the positive charge of the free ions and the phosphoserine groups in the protein. However, these phosphoserine groups predominantly form bonds with calcium phosphate in colloidal form. About 1/3 of the calcium, 2/3 of the magnesium, 1/2 of the inorganic phosphate, and almost all of the citrate are present in the aqueous phase. At the same time, the remainder is bound to phosphorylated casein residues as calcium phosphate [21].

The dairy industry also produces several valuable and reusable by-products [22]. The nutritional composition of processed dairy products is presented in Table 3.

Some manufacturers develop new beverages using ingredients with high nutritional value, such as milk, grains, and yogurt, to obtain health benefits [24]. Milk and dairy products, such as yogurt, are considered nutrient-dense foods due to their content of protein, potassium, and other nutrients, including phosphorus, zinc, and B vitamins. Intake of such products may be associated with higher dietary quality [25]. The benefits of milk are well known to the public, making this product easy to accept widely. However, it should be noted that some commercial dairy products often contain artificial sweeteners. The purpose of incorporating additives into products is to improve their flavor. This strategy can have adverse health effects [26].

Table 1. The content of macronutrients in milk from several animal species [20]

Таблица 1. Содержание макронутриентов в молоке нескольких видов животных [20]

Nutrient	Animal species		
	Cow	Goat	Sheep
Proteins (g/L)	30–39	30–52	45–70
Fat (g/L)	33–54	30–72	50–90
Lactose (g/L)	44–56	32–50	41–59

Table 2. The content of micronutrients in milk from several animal species [20]

Таблица 2. Содержание микронутриентов в молоке нескольких видов животных [20]

Nutrient	Component	Animal species		
		Cow	Goat	Sheep
Mineral	Ca, mg/100 g	112–123	1330–197	159–242
	P, mg/100 g	59–119	79–153	124–175
	Mg, mg/100 g	7–12	14–36	16–25
	Na, mg/100 g	42–58	28–59.4	30–37
	K, mg/100 g	106–163	140–242	94–162
	Fe, mg/100 g	0.03–0.1	0.05–0.3	0.08–0.1
	Se, µg/100 g	1.7	1.1–1.7	1.7
	I, µg/kg	66.82	591.06	243.16
Vitamin	Thiamine	28–90	40–68	28–80
	Riboflavine	116–202	110–210	160–429
	Niacine (B3)	0.13	0.24	0.41
	Pyridoxine (B6)	30–70	7–48	27–80
	Folic acid (B9)	1–18	0.24–1	0.24–56
	Cobalamin (B12)	0.27–0.7	0.06–0.07	0.30–0.71
	Vitamin A	41	48	64
	Vitamin D	0.08	0.25	0.18–1.18
	Vitamin E	20–184		120
	Vitamin K	1.1–3.2		

Functional dairy products are prominent in the functional food segment of the market. Dairy products account for more than 40% of the total and are mainly produced from fermented milk [27]. The production of functional milks, such as yogurt, continues to increase due to their benefits for gut and digestive health [28]. Yogurt can be classified based on the type of additives used, fat content (fat-free, low-fat, normal), and texture (liquid, solid, stirred) [29]. Yogurt texture is a sensory aspect that significantly affects consumer acceptance. Poor gel firmness and syneresis are two texture defects that can occur in yogurt. Efforts should be made to prevent this [30].

4. Mechanism of syneresis in dairy products

Dairy products, such as yogurt, are prone to syneresis due to the fermentation process. Syneresis is a defect in food production processes, characterized by the separation of liquid from the surface of a gel. This leads to a denser and less creamy texture of the product. Syneresis can result in a negative change in consumers' taste sensations [31,32]. The stability of yogurt structure depends on the balance between attractive and repulsive forces between protein molecules, particularly casein, which form a gel network during the fermentation process [33]. The resistance of yogurt gel to syneresis depends on its stiffness and water-holding capacity [34]. The main components of yogurt, including protein (*casein and whey*), carbohydrates (*lactose*), milk fat, calcium, and lactic acid, play a crucial role in forming the gel structure and its stability.

4.1. Proteins

Milk proteins include casein and whey proteins. They have different structures and functions. Casein participates in the gel formation in dairy products, while whey proteins are a soluble fraction that remains in the liquid phase after casein coagulation. Both components complement each other in forming the texture and stability of processed milk products and cheese. There are several casein fractions, namely, β and κ , which interact with each other to form polymer complexes [20]. Casein is generally a random coil that forms micelles, serving as the basis for the gel structure in milk. Casein is relatively resistant to thermal denaturation due to the absence of a clear tertiary structure [35]. However, heat and acid

Table 3. Nutritional composition of cow's milk and dairy products (per 100 g edible portion) [23]
 Таблица 3. Химический состав коровьего молока и молочных продуктов (в пересчете на 100 г продукта) [23]

Nutrient	Whole milk	Semi-skimmed Milk	Skim milk	Whole natural Yogurt	Whole greek yogurt	Skimmed natural Yogurt
Energy, Kcal	65.4/274	47.6/199	37/155	61.4/257	95	44.9/188
Proteins, g	3.1	3.5	3.9	4	8.78	4.3
Total lipids, g	3.8	1.6	0.2	2.6	4.39	0.32
Saturated fatty acids, g	2.3	1.1	0.09	1.5	2.39	0.11
Monounsaturated fatty acids, g	1.1	0.45	0.06	0.72	0.96	0.15
Polyunsaturated fatty acids, g	0.13	0.04	0.01	0.13	0.11	0
Cholesterol, g	14	6.3	2.6	10.2	17	1
Carbohydrates, g	4.7	4.8	4.9	5.5	4.75	6.3
Water, g	88.4	90.1	91	87.9	81.3	89.1
Calcium, mg	124	125	121	142	111	140
Iron, mg	0.09	0.09	0.09	0.09	<0.10	0.09
Iodine, µg	9	8.6	11.1	3.7	42.3	5.3
Magnesium, mg	11.6	11.9	28.6	14.3	10.7	13.7
Zinc, mg	0.38	0.52	0.54	0.59	0.47	0.44
Sodium, mg	48	47	53	80	34	57
Potassium, mg	157	155	150	280	147	187
Phosphorus, mg	92	91	97	170	126	109
Selenium, µg	1.4	1.5	1.6	2	N.D	1
Thiamine, mg	0.04	0.04	0.04	0.04	0.06	0.04
Riboflavin, mg	0.19	0.19	0.17	0.18	0.24	0.19
Niacin equivalents, mg	0.73	0.71	0.9	0.44	0.23	1.2
Vitamin B6, mg	0.04	0.06	0.04	0.05	0.04	0.08
Folate, µg	5.5	2.7	5.3	3.7	N.D	4.7
Vitamin B12, µg	0.3	0.3	0.3	0.2	N.D	0.4
Vitamin C, mg	1.4	0.52	1.7	0.7	N.D	1.6
Vitamin A (retinol equivalents), µg	46	18.9	Traces	9.8	38	0.8
Vitamin D, µg	0.03	0.02	Traces	0.06	<0.01	0
Vitamin E, mg	0.1	0.04	Traces	0.05	N.D	Traces

treatment alter the solubility of calcium phosphate salts and trigger the redistribution of Ca^{2+} from the micelles to the serum phase. This can disrupt intermicellar associations and affect gelation and syneresis [36–38].

Based on available information, and κ -casein are involved in calcium binding through electrostatic interactions with colloidal calcium phosphate (CCP). When the pH drops from around 6.7 to 4.6 (the isoelectric point of casein), casein micelles lose their negative charge, so that the electrostatic repulsion between micelles weakens and they begin to aggregate to form a three-dimensional network (gel). Meanwhile, κ -casein forms “brushes” on the surface of the micelles that provide steric and electrostatic stabilization that prevents micelle aggregation at normal pH (~6.7) [18,30,39].

Acid gelation of milk proteins begins when colloidal calcium phosphate (CCP) starts to dissolve. This process begins when the pH decreases from 6.7 to 6.0 and continues until it reaches a pH value of 4.6 or lower. At this point, casein micelles become unstable because the calcium-phosphate bonds between submicelles break down leading to protein coagulation as a result of hydrophobic interactions. In addition, gelation also involves changes in the primary structure of protein and the formation of a three-dimensional network through aggregation. Aggregation occurs through the binding of protein chains via covalent or non-covalent bonds. The strength of these bonds plays a vital role in the quality and stability of acid gels [40,41].

Whey proteins include several fractions, among which is the most common (comprising about 50% of total protein). It is followed by, serum albumin, proteose-peptone, immunoglobulins, and metalloproteins such as lactoferrin, transferrin, or ceruloplasmin. Whey also contains enzymes such as lipase, protease, and phosphatase. Whey proteins are globular, spherical in shape, tightly folded, and completely soluble in milk. One of the most important functional properties of whey proteins is their ability to form a gel. Gelation occurs when whey protein undergoes denaturation due to heating or changes in pH, allowing the protein molecules to create a strong three-dimensional network structure [23,42,43].

Extensive research has shown that the denaturation of milk proteins affects gel formation and syneresis [44]. Heating, drying, or packaging under heating conditions can cause protein denaturation, which can

potentially affect gel-forming properties. Denaturation of globular proteins results in the unfolding of the protein structure and exposure of previously hidden amino acid residues. In their native state, hydrophobic residues of globular proteins are located inside the molecule to avoid water. Denaturation results in the exposure of these hydrophobic residues, leading to the intermolecular hydrophobic interactions and subsequent aggregation [45].

Protein aggregation occurs through the formation of intermolecular cross-links, both covalent and non-covalent. During processing, intermolecular interactions may induce an ordered alignment of protein molecules, forming a fibrillar network similar to the structure of fibers [46]. During cross-flow filtration, the protein aggregates that form can accumulate and deposit on the membrane surface, creating a *fouling layer*. Uncontrolled aggregation can cause protein precipitation from the solution, while controlled interactions can affect gel formation, often reducing syneresis [45].

Heating milk above 70 °C causes thermal denaturation of proteins, particularly the disulfide bonds between (κ -CN), and (β -Lg), or the polymerization of whey proteins [44]. During the heating of milk, the tertiary structure of globular whey proteins breaks down, and free thiol groups are exposed. As a result, the thiol (–SH)/disulfide (SS) exchange reaction is triggered during the acidification of heated milk. These covalent bonds contribute to the strength of the yogurt gel [47]. At a temperature of 74 °C, remains in the micelles rather than dissolving and migrating into the milk serum, as it does under non-heated conditions. Heat treatment of milk causes aggregation of whey proteins and casein, resulting in the formation of a dense structure on the surface of casein micelles. This aggregation physically “blocks” or traps casein molecules, preventing their release into the serum phase [48].

4.2. Carbohydrates (lactose)

Lactose is the primary carbohydrate in milk, accounting for approximately 98% of the total carbohydrate content. At the same time, the remainder consists of small amounts of free glucose and galactose that are not bound within the lactose structure. In addition, the carbohydrate fraction of milk also contains other sugars in small amounts (less than 100 mg/L), as well as complex components such as glycoproteins and

glycolipids [23,42]. Derivatives of lactose transformation, such as lactulose, lactitol, and lactobionic acid, are not found naturally in fresh milk. However, when lactose is heated at moderate temperatures, isomerization to lactulose (4-O- β -D-galactopyranosyl-D-fructofuranose) can occur through the Lobry de Bruyn–Alberda van Ekenstein reaction, which proceeds via the formation of the 1,2-enediol intermediate. As a result, the concentration of lactulose will increase according to the level of heat treatment. Increased levels of lactulose have the potential to be used as a quality indicator in milk processing [49].

The transformation of lactose to lactic acid during fermentation causes a decrease in pH (increased acidity) in milk. This change increases the polarity of the liquid phase and affects the solubility of mineral salts, including colloidal calcium phosphate (CCP) bound to casein micelles. During heating or fermentation, the decrease in pH causes the dissociation of CCP, releasing calcium (Ca^{2+}) and phosphate ions into the serum phase (*liquid*). The released (Ca^{2+}) blocks the ionic bonds that maintain the structure of casein micelles, thus affecting the stability of colloidal micelles. As a result, protein interactions become unstable and contribute to the formation of a gel network during subsequent fermentation, especially when the isoelectric point of casein is reached (around pH 4.6) [20].

Lactose can bind water and form non-covalent interactions with proteins, such as hydrogen bonds and van der Waals forces. These bonds can increase the viscosity of the serum phase and contribute to the formation of a smooth and stable gel structure. However, excessive heating and uneven carbohydrate distribution can disrupt the ionic balance. Protein-carbohydrate interactions become unstable, resulting in syneresis and the formation of insoluble complex precipitates [42,50]. Thus, the role of lactose in gel formation and stability is highly dependent on the balance of its interactions with proteins and calcium ions, as well as on its concentration and distribution in the system. This imbalance in the interactions not only affects gel structure but also has the potential to increase syneresis in fermented dairy products.

4.3. Fat

Milk fat is an essential nutrient-rich component [51]. More than 400 types of fatty acids have been identified, but most of them are present in very small proportions, namely, less than 1% [23]. Milk fat is a complex nutrient consisting mainly of hydrolyzable lipids (99%), plus a small amount of non-hydrolyzable lipids (1%). These lipids form spherical microglobules that are emulsified in the liquid phase of milk. This condition enables digestive enzymes to act on the fat globules, breaking them down or hydrolyzing them [52].

The casein network retains fat globules during the gel formation process. Milk proteins naturally adhere to the surface of the fat globules, and this interaction is crucial for the formation of the yogurt gel structure. The remaining water-soluble fraction, known as serum, consists of water, lactose, minerals, and unbound whey proteins dispersed in it. The presence of fat has a significant impact on the strength of yogurt gels. A higher fat content results in stronger gels and higher storage modulus (G') values. Conversely, fat separation weakens the gel structure [53]. To reduce the size of fat globules and prevent fat separation, homogenization can be performed at pressures of 15–20 MPa and temperatures of around 65–70 °C, either through single-stage homogenization or two-stage homogenization at pressures of 10–20 and 5 MPa. After heat treatment, the homogenization promotes denatured whey proteins to cover the surface of the casein micelles and integrate into the fat membrane, thereby increasing the firmness of the final product [30,53].

4.4. Calcium

Calcium is a significant mineral that not only serves as a nutrient but also maintains stability and forms the structure of casein micelles. Approximately 65–70% of calcium in milk is bound in colloidal form (*colloidal calcium phosphate*) within casein micelles. At the same time, the rest is insoluble (ionic Ca^{2+} , CaHPO_4 , and Ca citrate) in the milk serum phase. In the aqueous phase, calcium (Ca) is present in free form associated with citrate, inorganic phosphate, and whey proteins. Approximately two-thirds of the total calcium is bound to casein in the form of micelles or calcium phosphocaseinate, which is associated with organic phosphates of phosphoserine residues on the casein molecule [54]. Both are in dynamic equilibrium. Several factors, including temperature, pH, and ionic strength, can influence these molecules. Ca is thermodynamically balanced between the aqueous and micellar phases, depending on the chemical conditions [20]. The dissolution of colloidal calcium phosphate (CCP) during acidification increases serum calcium, thereby facilitating casein aggregation and the development of a gel network in yoghurt. This process also disrupts the internal structural properties of casein micelles as the pH decreases [41,55].

During the process of heating milk, some of the calcium that was initially soluble may become insoluble. In milk, calcium exists in two primary forms: the serum phase (*the liquid phase*) and the colloidal phase. In the serum phase, calcium is present as calcium ions (Ca^{2+}), calcium citrate, or calcium phosphate [44]. During heating, the solubility of calcium phosphate decreases, causing some calcium from the serum phase to transfer to the colloidal phase and form colloidal calcium phosphate. As a result, the levels of calcium and phosphate dissolved in the serum decrease, while the level of calcium phosphate in the colloidal phase increases. If heating is carried out at a moderate temperature, then after cooling, most of the transferred calcium can redissolve into the serum phase. However, when heated at high temperatures, this recovery is incomplete, resulting in an irreversible change in the calcium balance in milk [56]. From a health perspective, calcium plays a crucial role in the growth and development of children's bones, as well as in preventing osteoporosis in older individuals. Furthermore, adequate calcium intake can help reduce cholesterol absorption, control blood pressure, and maintain a healthy weight.

4.5. Lactic acid

Groups of microorganisms, such as lactic acid bacteria (LAB), have been widely used to produce fermented drinks, including yogurt as a processed milk product. Their probiotic, physiological, and survival qualities contribute to improving the nutritional value and sensory properties of the product. Compounds produced by LAB also play a role in inhibiting spoilage microorganisms [57]. During fermentation, lactic acid bacteria (LAB) convert lactose into lactic acid. The fermentation process causes physical changes, including changes in nutritional composition and the production of secondary metabolites. Decreasing the pH of milk from around 6.7 to ≤ 4.6 causes an acidification process that triggers protein coagulation and gel formation. Casein begins to lose its stability at pH 5.3–5.2, then precipitates and denatures when the pH reaches 4.7–4.6. To stop fermentation and prevent further acidification, yogurt must be immediately cooled to a temperature of $< 5^\circ\text{C}$ when the pH reaches ~ 4.6 . Enzyme and microbial activity can cause the breakdown of components such as water, fat, protein, and other minor compounds or metabolites [57,58].

There are several methods to minimize syneresis in yogurt. The ingredients, such as milk powder, whey protein, casein, and gelatin, are often added for this purpose. Among all these additives, casein and gelatin are the most effective in preventing syneresis [30]. Additionally, yogurt processing stages, including homogenization, fermentation, storage duration, and cooling, also affect the final product.

5. Stabilizers

Stabilizers are essential food additives. They are usually added to dairy products to improve viscosity and sensory properties, slow down whey separation, and increase the total solids content. The addition of stabilizers can improve food's functional properties but also impact food's physical, chemical, and sensory properties. Some sources of stabilizers, such as *carboxyl methyl cellulose*, are synthetic. There is an increasing consumer demand for Halal and natural stabilizers [59].

6. Synthetic stabilizers

In the beverage industry, the quality and shelf life of products are significant challenges. Some consumers are willing to pay more for food with good sensory qualities [60]. To maintain the physical and sensory characteristics of beverages, synthetic additives are often used as additional ingredients [61]. The role of synthetic additives is to stabilize and preserve the taste, aroma, texture, and color of products, as well as to extend their shelf life.

There are several types of additives, but in general, they can be divided into four groups based on the method of production and origin. There are natural additives derived from plants and animals; synthetic additives designed to mimic the properties and functions of natural additives; natural additives modified with chemicals, and artificial synthetic additives [62].

Synthetic additives are widely used in the food industry to maintain and improve the quality of beverages. Despite their useful functions, excessive consumption of synthetic additives can negatively influence consumers' health. Although the use of synthetic additives is highly effective, there are studies showing that they can cause mutations and carcinogenicity in humans [63]. Baran et al. [64] stated that the use of synthetic stabilizers in mice was associated with effects such as obesity, impaired glycemic control, low-grade uric acid inflammation, and colon carcinogenesis. Such risks mainly arise when these substances are consumed at levels exceeding the threshold values set by food regulatory agencies. Therefore, controlling the amount and type of additives used is crucial to ensuring consumer safety and health.

7. The natural stabilizer derived from purple sweet potato flour (*Ipomoea batatas* L)

The sweet potato is a type of tuber that can grow in tropical and sub-tropical climates, demonstrating high adaptability [65]. The purple sweet potato sold on the market is widely used for fresh consumption and as an ingredient in processed foods [18]. The nutritional and functional values of fresh purple sweet potato are shown in Table 4.

Table 4. Nutrient content in 100 g purple sweet potato [66]

Таблица 4. Содержание питательных веществ в 100 г фиолетового батата [66]

Category	Nutrient	Content
Nutritional and calorie	Calorie, kcal	86
	Carbohydrate, g	20.12
	Protein, g	1.57
	Fat, g	0.05
	Vitamin A, SI	
	Vitamin C, mg	2.40
Compounds	Ca, mg	30
	Carbohydrate	12.64
	Reducing sugar, %	0.30
	Fat, %	0.94
	Protein, %	0.77
	Water, %	70.46
	Ash, %	0.84
	Fiber, %	3.00
	Vit. C, mg	21.43
	Anthocyanin, mg	110.51
	Beta carotene, mg	–

The purple sweet potato is highly susceptible to oxidation and discolouration during processing, distribution, and storage. Drying is one of the processes used to stabilize bioactive compounds in it [67]. To extend shelf life, the purple sweet potato can be processed into flour. Purple sweet potato flour has several advantages, including its use as a substitute for other flours, greater storage stability, and availability of raw materials regardless of the harvest season. Additionally, this flour can be easily modified to maintain its bioactive properties, thereby enhancing the functional value of the product [68]. Purple sweet potato flour can also be used as an additive in various food products such as baby food, pasta, and fried foods [5]. In the food industry, flour serves as the primary thickening agent in sauces, soups, snacks, and bakery products [69]. Factors that influence the quality of processed products are physicochemical properties such as water absorption, solubility, and viscoelasticity. Several studies have shown that the water absorption index of sweet potato starch is

similar to that of commercial wheat flour. The physicochemical characteristics of purple sweet potato starch are presented in Table 5.

7.1. Starch

Starch is the main component in the purple sweet potato [70]. In developed countries, the sweet potato (*Ipomoea batatas*) is the primary source of starch production [59]. Starch consists of two parts, namely digestible and indigestible starch (resistant starch). Resistant starch is not broken down in the small intestine but can be fermented in the large intestine in small amounts or completely. Although not digested, these starches provide health benefits, including reducing the risk of cancer and colon cancer, preventing the formation of gallstones, controlling hypoglycemia, and promoting the absorption of minerals in the body [18].

Starch has been widely used as a thickener, stabilizer, and gelling agent in various applications. Its high water holding capacity enhances strong interactions with milk proteins [71]. The starch used in yogurt production reduces defects, including surface-related ones, and improves texture [59]. Additionally, starch can improve flavor. Corn starch has long been used as a thickener and as a fat replacer in yogurt. Recently, other types of starch, such as kudzu starch, tapioca starch, water chestnut starch, and potato starch, have also been used [30].

Physical and chemical modifications are often carried out to improve the functional properties of natural sweet potato starch. A commonly used method is gelatinization [72,73]. Starch mixed in the solution requires heating for its gelatinization or expansion of its properties. Heat treatment aims to achieve a gel state with the consistency of a thick solution [74]. This process can increase water absorption and granule swelling [75]. It has been shown that gelatinized starch can improve food products' stability, texture, and hydration characteristics [76]. Heating food products to high temperatures in order to form gels, may limit their use in certain types of food, as this process may alter the properties of the products [74].

7.2. Fiber

In addition to meeting your fiber needs, dietary fiber has functional and nutritional benefits. Fiber can be soluble and insoluble. Soluble fiber can increase viscosity, form gels, reduce glycemic response, and lower cholesterol levels. In contrast, insoluble fiber, increase fecal volume and intestinal transit. The nutritional properties of fiber can affect physicochemical characteristics of products, such as water-holding capacity, viscosity, interaction with other molecules, and fermentation [77]. In dairy products, especially probiotic products, fiber is widely used as a multifunctional additive. The stabilizing effect of fiber can change with different formulations in dairy products such as ice cream and beverages [78]. Fiber can bind water, slowing down its free flow in the gel structure. This process leads to water binding and a decrease in syneresis [14].

7.3. Anthocyanins

Purple sweet potato flour is rich in anthocyanins. Anthocyanins are natural colorants with various bioactive properties. Anthocyanins' molecules provide purple sweet potato flour with color and, antioxidant

Table 5. Physicochemical characteristics of purple sweet potato starch [66]

Таблица 5. Физико-химические свойства крахмала из фиолетового батата [66]

Characteristics	Unit	Content
Physico-chemical characteristics of starch	Moisture content, %	5.84
	Protein, %	3.21
	Starch, %	64.63
	Bulk density, mg/l	0.43
	Anthocyanin content	19.75
	Water absorption index, ml/g	1.69
	Water solubility index, g/ml	17.36
	Hot viscosity, cp	–
	Cold viscosity, cp	7.84
	The beginning temperature of gelatinization/SAG, °C	75.75
Amylographic characteristics of starch	Maximum viscosity, cp	5523
	Temperature of maximum viscosity, °C	–
	Viscosity at temperature 95 °C	4332
	Breakdown viscosity, cp	3049
	The viscosity of cooling at a temperature of 50 °C, cp	3493
	Setback, cp	1244
	Stability of pasta, cp	–
Amilose and amilopektin content	Amylose content, %	43.78 ± 0.56
	Amylopectin content, %	44.24 ± 4.71

properties [79,80]. From a sensory point of view, anthocyanins in the purple sweet potato are considered safer than synthetic colorants, so consumers prefer them. Anthocyanins can also act as natural water-soluble colorants. Anthocyanins can produce attractive colors for food, such as blue, red, and purple. The extraction of anthocyanins from purple sweet potato flour offers a natural alternative, a simple extraction process, and lower cost efficiency [67].

Anthocyanins in the purple sweet potato are more stable to heat and UV light exposure than other fruits and vegetables, such as strawberries, apples, and cabbage, due to their high degree of acetylation. Anthocyanins from the purple sweet potato have greater resistance to gastrointestinal conditions compared to less complex anthocyanins, such as those found in red wine. Therefore, these beneficial characteristics highlight the potential use of the purple sweet potato as a source of natural food ingredients [81].

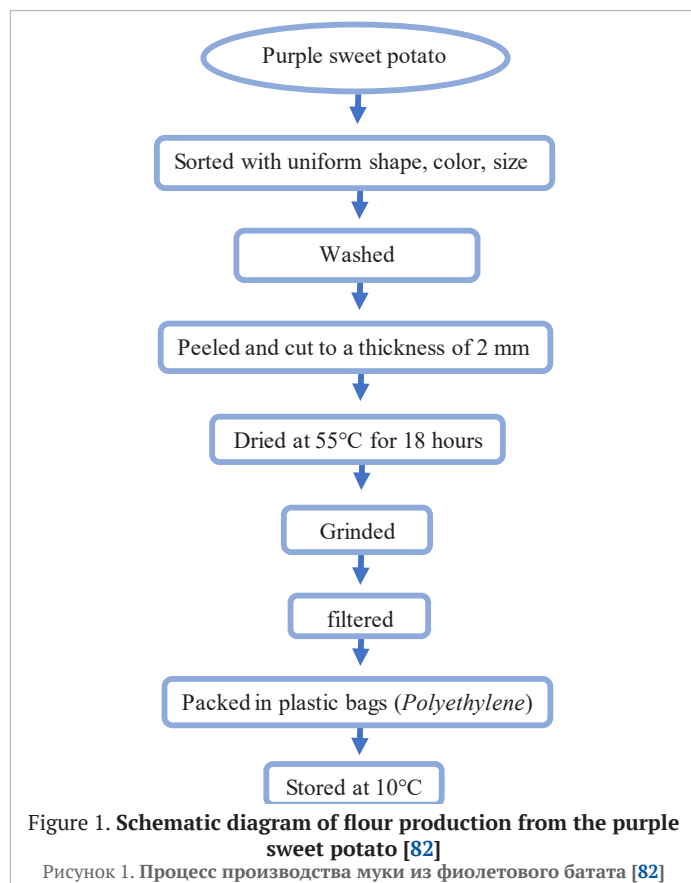
7.4. Flavonoids

Many studies have attempted to replace synthetic additives containing antioxidants with natural ingredients. Polyphenols and flavonoids are secondary metabolites in plants that have many benefits [63]. Flavonoids can be found in the purple sweet potato, containing anthocyanin compounds and glucose-bound quercetin (glycosides) [57]. These compounds are antioxidants capable of scavenging free radicals. In addition, they provide hydrogen atoms, electrons, and chelate metal cations. Flavonoids act as antioxidants by transferring hydrogen atoms to free radicals. Therefore, the higher the flavonoid content, the greater the antioxidant capacity to transfer hydrogen. Based on *in vitro* research, flavonoids in plants have antioxidants that exhibit antioxidant activity comparable to that of synthetic antioxidants. However, this requires commercial methods and developments [63].

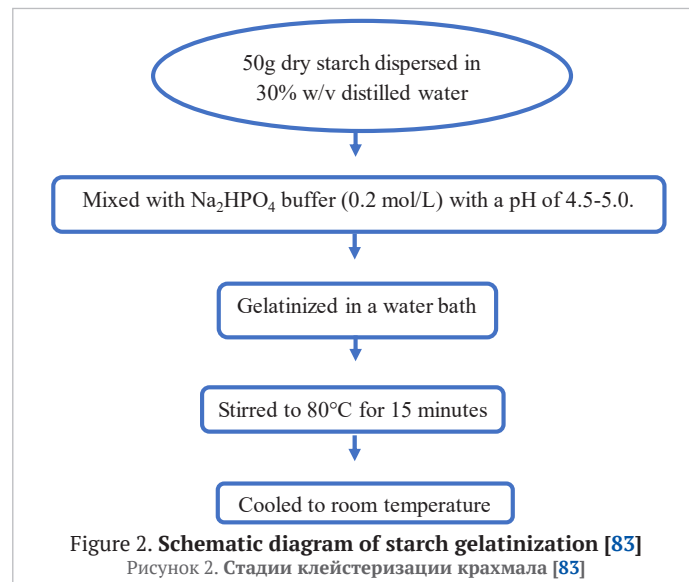
Purple sweet potato flour is a valuable ingredient in food processing and demonstrates the potential of this plant for broader applications. Its functional properties, such as water absorption, can impact the texture of final products. The use of purple sweet potato flour can also prevent losses and can be used in the production of various food ingredients. In addition, it also serves as a source of energy and minerals, providing products with a sweet taste and attractive color. The nutritional-value of purple sweet potato flour plays a vital role in the development of various food formulations [65].

8. The production process of flour from the purple sweet potato

We can see the production process of flour from the purple sweet potato in Figure 1.



Before adding purple sweet potato flour to dairy products, it should be heated at a high temperature until gelatinization occurs. The gelatinization process is expected to result in water binding and reduced syneresis in dairy products. This process is an essential step in breaking down the starch structure. The starch granules absorb water during this process, which initiates the swelling phase. Heating accelerates the swelling of starch granules and breaks their structure, accelerating gelatinization [75]. The stages of processing purple sweet potato flour before starch gelatinization can be seen in Figure 2.



Physical treatment of starch is widely used, one type of which is a heat treatment with limited water content. Moist-heat treatment is a hydrothermal method of physical modification, in which starch is heated at a temperature exceeding its gelatinization point (approximately 80–120 °C) with a limited water content of 10–35 % for 15 minutes to 16 hours. This technique is environmentally friendly, safe, and cost-effective for improving starch characteristics. Several studies have reported that an increase in temperature leads to an increase in the swelling capacity of starch. Starch granules heated at the initial temperature will swell due to weak hydrogen bonds in the amorphous region. This is caused by stronger interactions between starch polymer chains, including amylose-amylopectin, amylopectin-amylopectin, and interactions between starch and lipids. This also indicates an increased water-binding capacity in starch granules [65,84]. The application of purple sweet potato flour in dairy products is illustrated in Table 6.

9. Factors causing syneresis

The main components of the purple sweet potato, including starch, fiber, and anthocyanins, can impact the level of syneresis in dairy-based products. Mechanisms that contribute to syneresis include the concentration of additives (such as starch and fiber), changes in acidity (pH), and the protein and fat content in the system. In addition, heat treatment, storage temperature, and storage duration also play an essential role in determining the physical stability of the product [87,91].

9.1. Quantity of ingredients

In general, syneresis in yogurt can be reduced by adding approximately 14 % (w/w) total solids to the product [92]. Increasing the total solids and protein content can strengthen the gel structure and increase the gel's water-holding capacity [53]. The addition of purple sweet potato flour can improve consistency, viscosity, and taste because the fiber/solids content can bind water in yogurt [81]. The concentration of flour added must be considered. Adding too much flour can make the product overly thick, create a heavy mouthfeel, and produce a distinct *aftertaste* reminiscent of potatoes or other tubers. Conversely, if the flour concentration is too low, the stabilizer will be ineffective, and syneresis will still occur [30,81,89].

The addition of purple sweet potato flour can increase water-binding capacity due to its content of cellulose, lignin, pectin, hemicellulose, and fiber, among other compounds. The amount of fiber can reduce the pore size in the gel matrix, thereby retaining water [87]. Killinç et al. [87], as presented in Table 6, compared the effect of adding freeze-dried sweet potatoes on the nutritional quality of yogurt sets. The results showed that adding 2 % purple sweet potato flour was more beneficial because it contained higher levels of cellulose, lignin, pectin, and hemicellulose than orange sweet potato flour.

Table 6. Application of purple sweet potato flour

Таблица 6. Применение фиолетового батата

Dairy Products	Result	References
Ambon banana yogurt	The addition of 2% purple sweet potato flour to Ambon banana yogurt ensures the best quality. Purple sweet potato flour has the potential to be a stabilizer for yogurt production.	[14]
Ice cream	Adding purple sweet potato flour affected the water and anthocyanin content but didn't change the antioxidant activity of the ice cream. A ratio of water to purple sweet potato flour of 2:8 was optimal for high water content, standard overrun, anthocyanin content, and antioxidant activity.	[85]
Greek yogurt	Fortification with purple sweet potato flour reduces syneresis, increases water retention capacity, inhibits post-acidification processes, increases viscosity, elasticity, and hardness, and improves color stability during storage. Adding 4% sweet potato flour makes the yogurt firmer and more elastic. These results indicate that purple sweet potato flour is a multifunctional natural ingredient.	[86]
Stirred yogurt	Purple sweet potato flour can provide different colors, increase water retention capacity, and reduce water activity. In general, the addition of purple sweet potato flour improves the microstructure of yogurt, and the addition of 4% and 6% of it makes the yogurt denser and softer. These results indicate that purple sweet potato flour can be used in the food industry to enhance functionality and serve as a natural coloring agent, stabilizer, emulsifier, and thickener in dairy products.	[81]
Set yogurt	The addition of 2% purple sweet potato to yogurt resulted in a dry matter content of 8.45%, water holding capacity of 50.90%, total phenolics reaching 2.64 mg GAE/g, and DPPH radical scavenging activity of 112.97%. The yogurt contained the highest mineral content of potassium (2,765,987.42 ppb), followed by sodium (250,078.00 ppb) and magnesium (203,691.47 ppb). The texture of the yogurt also improved with the addition of 2% purple sweet potato. It was characterized by the highest firmness value of 229.07 g, consistency of 2,690.00 g, cohesiveness of -81.70 g, and viscosity index of -290.54 g. The addition of sweet potato to the yogurt samples had a significant impact on the pH, which can affect the final quality of the product.	[87]
Goat milk yogurt with the addition of pineapple and purple sweet potato	Water binding capacity, solubility, and viscosity reached 10.73%, 3.08%, 90%, and 352.93%, respectively, along with a decrease in syneresis by 15.73% compared to goat milk yogurt without the addition of fruit and sweet potato.	[88]
Yogurt	The sensory evaluation of the sample with 2% flour scored highly. The fat content of each sample was similar. Physicochemical parameters and water holding capacity (WHC%) showed significant differences. Scanning Electron Micrograph (SEM) results of yogurt enriched with purple sweet potato flour showed a denser structure, with lumps of flour that appeared to be attached to the gel matrix. The results obtained in this study show that the sweet potato can contribute to the production of cohesive and dense yogurt and can be used as a substitute for industrial stabilizers.	[8]
Non-fat set yogurt	The addition of 1% starch reduced syneresis and increased the firmness of yogurt. Differences in amylose content in starch led to variations in yogurt quality. Yogurt had higher viscosity with the addition of corn and tuber starch. Long storage time can change the characteristics of yogurt, leading to syneresis (wheying-off). However, the pH didn't change. Sensory properties were different in the yogurt with added starch and the control sample. The results showed that yogurt with the addition of tuber or chickpea starch was the most promising.	[89]
Ice cream	Steaming was used to retain anthocyanins in the sweet potato. The results showed that in terms of sensory properties (aroma, taste, texture, and color), it was accepted by 26 panelists.	[90]

9.2. pH and acidity

Probiotic dairy products, such as young yogurt, experience a gradual decrease in pH during the fermentation process. Technological aspects, including pH and acidity, during yogurt processing are essential parameters for assessing product quality. Increased milk acidity can cause casein instability when the pH drops below the isoelectric point, resulting in syneresis [93]. Dairy products will curdle and form a three-dimensional protein network in which whey is trapped [94].

Purple sweet potato flour has a significant impact on the pH of dairy products. Increasing the amount of sweet potato flour causes a decrease in pH [8,95]. As shown by Kilinc et al. [87] as presented in Table 6, acidity also plays a role in forming structure and syneresis. At a pH of 4.0–4.6, the viscosity of the product increases and syneresis decreases, while at high acidity levels, below pH < 4.6, the water-binding capacity is very weak. The addition of purple sweet potato flour to dairy products reduces the pH of yogurt due to compounds in its structure, which causes a decrease in syneresis and an increase in water-holding capacity (WHC).

The starch contained in purple sweet potato flour is thought to increase the availability of carbon source nutrients for lactic acid bacteria (LAB). The increase in acidity in yogurt is caused by the conversion of lactose to lactic acid, which occurs more quickly due to higher LAB proliferation and viability [14]. Additionally, the increase in viscosity and water-holding capacity (WHC) of starch in purple sweet potato flour can reduce osmotic stress and help maintain a medium moisture level. This results in a more stable fermentation environment for LAB growth [8]. Phenolic compounds in purple sweet potato flour have antimicrobial activity, damaging the protective layer of cells and disrupting the functioning of microbial enzymes. Proper formulation can support the growth of probiotic LAB [81,87].

9.3. Protein and fat content

In general, the denaturation of milk proteins, particularly β -lactoglobulin and α -lactalbumin, is a crucial step in the yoghurt-making process. However, denaturation can disrupt the protein gel structure, triggering syneresis. The addition of stabilising agents such as starch increases the hydrophilic properties of proteins, thereby enhancing their ability to bind water [14]. Purple sweet potato flour offers a combination of starch, fibre, and anthocyanins that serve as both thickening and stabilising agents in protein systems, thereby increasing the viscosity and

water retention of products [96]. Modified purple sweet potato particles can form Pickering stabilisers at the oil–water interface. This can reduce coalescence and improve the stability of protein-based emulsions during heat treatment and freeze-thaw [37]. Non-covalent interactions between purple sweet potato anthocyanins and proteins can enhance colour stability and influence the protein network structure, ultimately affecting the final texture of the product [81].

The composition and properties of fat have a significant impact on food structure and the perception of fat texture. High fat content can affect yogurt quality, including increased viscosity, density, a creamy texture, elasticity, and hardness. Reducing the fat content in dairy products can compromise texture, which in turn affects taste and aroma. Fat is essential for taste perception because flavour compounds in food are soluble in fat. Therefore, the amount of fat in a product is crucial for the final quality of the product [18]. Fat substitutes, such as modified starch or inulin, can alter rheological properties by mimicking the function of fat globules or affecting water-binding capacity. Homogenization alters the size and distribution of fat globules, resulting in changes in viscosity, texture, and stability [53]. Purple sweet potato flour has a low-fat content. According to El Attar et al. [8] (Table 6), the addition of sweet potato flour (control, 0.5, 1, 2, and 4 g/100 g milk) resulted in a fat content of 2.87–3.50 g/100g, demonstrating no significant effect on fat content.

9.4. Heat treatment

Heating milk at high temperatures can cause denaturation of whey proteins, which affects the gel strength of yoghurt [47]. In a study by Gao et al. [97], the texture and rheological properties of fermented milk were affected by heating (55–85 °C for 25 seconds), which impacted the final properties of the fermented milk. Treatment below 65 °C increased gel strength, firmness, and viscosity due to the formation of moderate aggregation and stable microgel bonds. Conversely, heating above 65 °C reduced texture quality due to the formation of large aggregates (~46–63 μ m) that produced coarse and undesirable grains. Purple sweet potato flour has a high starch content. During the heating process, the starch undergoes partial gelatinisation, which increases the viscosity of the yoghurt matrix and helps maintain gel stability [62,71]. Starch particles and fiber from the purple sweet potato can act as natural Pickering stabilizers, which protect the protein structure during heating [96].

9.5. Storage temperature

Storage temperature is one of the factors that determines the stability of yogurt and other dairy products. Arab et al. [30] found that at higher storage temperatures, microbial activity and changes in protein structure due to partial denaturation can cause a decrease in water-holding capacity (WHC), thereby increasing the likelihood of syneresis. This process is exacerbated by the degradation of the gel network formed during fermentation, which becomes more fragile due to temperature fluctuations. Gao et al. [97] emphasize that maintaining a constant, low storage temperature is crucial for preserving the texture and stability of fermented dairy products. These findings provide further insight into the mechanisms underlying the formation of fermented milk quality after heating, and offer new perspectives for addressing potential texture defects in fermented milk products during storage in environmental conditions.

The content of purple sweet potato flour can increase viscosity and strengthen the protein gel structure. The components of purple sweet potato flour can bind water and milk proteins, forming a denser and more stable three-dimensional network during storage at low and fluctuating temperatures [81]. Saleh et al. [89] (Table 6) stored differently treated samples at 4 °C before conducting sensory and physicochemical quality tests. Cota-López et al. [98] also confirmed that the addition of retrograded starch to fermented milk products can maintain gel stability despite variations in storage temperature. Thus, the use of purple sweet potato flour as a natural stabilizer can be an effective strategy for preserving the microstructure of milk gel and preventing an increase in syneresis due to temperature changes during storage.

9.6. Long storage

Storage duration is one of the primary factors influencing the physical stability of processed dairy products, such as yogurt. Physical defects in yogurt can be observed after it has been processed and stored for a specified period [30]. Storage duration can accelerate syneresis due to changes in protein structure and a decrease in water-holding capacity (WHC). This is caused by the post-acidification process and the rearrangement of protein networks during storage. This process causes syneresis [99]. Experimental studies also report that during cold storage, post-acidification 'increases the size of casein particles,' contributing to changes in gel structure and a decrease in WHC [100]. The yogurt studied by Anwar et al. [101] had optimal fermentation times of 6 hours for sheep's milk, 7 hours for cow's milk, and 5 hours for the mixture of both. To maintain quality, the optimal storage period was up to 14 days at 4 °C. Sheep milk yogurt excels in terms of acidity, bacterial count, water-binding capacity, and taste, making it suitable for use in probiotic products. The longer the product is stored, the greater the chance of protein gel structure degradation.

The second cooling process is carried out in stages over 12 hours to improve the yogurt's quality. Cooling too quickly can cause a weak gel structure and increase the likelihood of syneresis during storage. Meanwhile, in the production of drinking yogurt, the fermented product is stirred, then diluted, and stabilizers are usually added to maintain its stability [53]. The addition of 4–6% purple sweet potato powder (lyophilized powder) to yogurt contributes to a denser, more compact gel network and reduces the rate of syneresis during 30 days of storage. Bioactive compounds in purple sweet potato flour can interact with milk proteins, thereby maintaining the product's microstructure stability during long-term storage [81].

10. Development prospects

The prospect of developing purple sweet potato flour as a natural stabilizer in Indonesia is promising. Indonesia is a tropical country with fertile soil and diverse natural resources. Based on its resource potential, Indonesia has abundant food availability [102]. After China, Indonesia occupies an essential position as the leading producer of the purple sweet potato [66], especially when compared to other crops. The purple sweet potato has a more expansive production geography, adaptability, and

short production cycle; in addition to high nutritional value, it also has sensory advantages in flesh color, taste, and texture [103].

The cultivation of purple sweet potato can be done in various ways. The majority of cultivation is carried out on dry land, with attention to soil and water management as the key to success [66]. Based on the results of field research, the most common varieties of the sweet potato are white, yellow, and orange. After the discovery of the purple sweet potato, it attracted public attention. The purple sweet potato has good prospects because it's in high demand. Apart from having an attractive color, the purple sweet potato also has health benefits [102]. This development is in line with the global trend of increasing interest in functional foods. Consumer demand for the use of natural and organic ingredients is rising. Consumer awareness of using natural ingredients, minimal processing, and the avoidance of negatively perceived ingredients, such as allergens or additives, is growing. This creates market opportunities for processed food products that use purple sweet potato flour as a base [104].

Developing Indonesia's purple sweet potato processing industry can positively impact the community's economy and the livelihoods of sweet potato farmers. In addition to increasing food diversification, the development of the purple sweet potato flour industry can also create jobs and provide benefits in both health and the economy [105]. In 2022, the Indonesian Ministry of Agriculture initiated a purple sweet potato planting program spanning 2,000 hectares (ha) across several locations. This program aims to stimulate the economy through the food potential of rural products, such as purple sweet potato flour [66]. The high demand for the sweet potato as a raw material for the food industry will increase farmers' income and promote greater efficiency in the purple sweet potato production. The purple sweet potato in South Korea and Japan has become a healthy food trend due to its good nutritional value [106].

The utilization of the purple sweet potato in Indonesia as a functional food is still limited. The sweet potato is generally consumed by frying or boiling, and in the form of chips and traditional foods such as *timus* [107]. This is due to the lack of public knowledge regarding the purple sweet potato processing. This situation can be attributed to the lack of purple sweet potato processing technology and the increasing consumer demand for suitable products. Therefore, the government needs to provide strong support for the processing industry in order to stimulate the development of the products from the sweet potato [66]. In developing countries, millions of people consider the sweet potato as an essential food source [8]. Therefore, the use of the purple sweet potato should be achieved through product diversification. The product diversification process is expected to produce foods that are nutritious, attractive, and have added value with the use of simple technology [107]. Some efforts can also be made to promote the purple sweet potato. One approach involves providing the public with information on the benefits of the purple sweet potato through promotions and conducting field practices on the utilization of the purple sweet potato [105].

11. Conclusion

Dairy products such as yogurt often undergo syneresis, resulting in the separation of liquid and solids, which therefore requires the use of stabilizers. Purple sweet potato flour contains starch that easily absorbs water and swells, making it a suitable natural stabilizing agent. In addition to starch, the purple sweet potato also contains fiber, protein, sugar, minerals, and anthocyanins, which play an essential role in strengthening gel structures and preventing syneresis. The anthocyanins in the purple sweet potato can also act as antioxidants, adding value to the final dairy product. These components can bind with milk proteins and fats, forming a more stable gel structure. Other factors such as heat treatment, storage temperature, and storage duration also affect the physical stability of the product. The prospects for developing the purple sweet potato in Indonesia are promising due to its high agronomic potential, good nutritional value, and opportunities for use as a natural raw material in the functional food industry.

REFERENCES

- Waszkiewicz, M., Sokół-Łętowska, A., Pałczyńska, A., Kucharska, A. Z. (2023). Fruit smoothies enriched in a honeysuckle berry extract – An Innovative product with health-promoting properties. *Foods*, 12(19), Article 3667. <https://doi.org/10.3390/foods12193667>
- D'Amico, A., Buzzanca, C., Pistorio, E., Melilli, M. G., Di Stefano, V. (2024). Fruit juices as alternative to dairy products for probiotics' intake. *Beverages*, 10(4), Article 100. <https://doi.org/10.3390/beverages10040100>
- Oliveira, P. H. D. A., Oliveira, A. K. D., Coêlho, E. D. S., Silva, V. N. E., Lopes, W. D. A., Santos, G. L. D. et al. (2023). Chemical quality and bioactive compounds of sweet potatoes under phosphate fertilization. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 28(1), Article e274451. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriam-bi.v28n1e274451>
- Maqsood, S., Basher, N. S., Arshad, M. T., Ikram, A., Kalman, D. S., Hossain, M. S. et al. (2025). Anthocyanins from sweet potatoes (*Ipomoea batatas*): Bioavailability, mechanisms of action, and therapeutic potential in diabetes and metabolic disorders. *Food Science and Nutrition*, 13(9), Article e70895. <https://doi.org/10.1002/fsn3.70895>
- Liu, Y., Shen, W., Jin, W., Li, F., Chen, X., Jia, X. et al. (2024). Physicochemical characterization of a composite flour: Blending purple sweet potato and rice flours. *Food Chemistry: X*, 22, Article 101493. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2024.101493>
- Widaningrum, Misgiyarta, Darniadi, S., Purwani, E. Y. (June 20–21, 2023). *Potential of new varieties of sweet potato released by Indonesian Legumes and Tuber Crops Research Institute (ILETRI): A preliminary study*. IOP Conference

- Series: Earth and Environmental Science, 1172(1), Article 012052. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1172/1/012052>
7. Górski-Warzewicz, H., Rejman, K., Laskowski, W., Czaczkotko, M. (2019). Milk and dairy products and their nutritional contribution to the average polish diet. *Nutrients*, 11(8), Article 1771. <https://doi.org/10.3390/nu11081771>
 8. El-attar, A., Ahmed, N. E., El-Soda, M., Zaki, S. M. (2022). The impact of sweet potato flour supplementation on functional and sensorial properties of yoghurt. *Food and Nutrition Sciences*, 13(4), 404–423. <https://doi.org/10.4236/fns.2022.134030>
 9. Sezer, E., Ayar, A., Yilmaz, S. Ö. (2022). Fermentation of dietary fibre-added milk with yoghurt bacteria and *L. rhamnosus* and use in ice cream production. *Fermentation*, 9(1), Article 3. <https://doi.org/10.3390/fermentation9010003>
 10. Adinepour, F., Pouramin, S., Rashidinejad, A., Jafari, S. M. (2022). Fortification/enrichment of milk and dairy products by encapsulated bioactive ingredients. *Food Research International*, 157, Article 111212. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.111212>
 11. Prestes, A. A., Vargas, M. O., Helm, C. V., Esmerino, E. A., Silva, R., Prudencio, E. S. (2021). How to improve the functionality, nutritional value and health properties of fermented milks added of fruits bioactive compounds: A review. *Food Science and Technology*, 42, Article e17721. <https://doi.org/10.1590/fst.17721>
 12. Wróblewska, B., Kuliga, A., Wnorowska, K. (2023). Bioactive dairy-fermented products and phenolic compounds: Together or apart. *Molecules*, 28(24), Article 8081. <https://doi.org/10.3390/molecules28248081>
 13. Tajidan, T., Fernandez, E., Nursan, M., Effendy. (2025). *A Product diversification to increase marketing value: Learning from E-commerce pasarmandalika.com*. Proceedings of the 6th International Conference on Education and Social Science (ICESSE 2024), Atlantis Press, 2025. https://doi.org/10.2991/978-2-38476-392-4_3
 14. Yuliana, N., Zuidar, A. S., Arpani, A. P. (2023). The effect of fermented sweet potato flour supplementation on the characteristics of ambon banana yoghurt. *MOJ Food Processing and Technology*, 11(2), 106–109. <https://doi.org/10.15406/mojfpt.2023.11.00287>
 15. Mousavi, S. M. E., Mousavi, M., Kiani, H. (2020). Characterization and identification of sediment forming agents in barberry juice. *Food Chemistry*, 312, Article 126056. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.126056>
 16. Mesias, F. J., Martín, A., Hernández, A. (2021). Consumers' growing appetite for natural foods: Perceptions towards the use of natural preservatives in fresh fruit. *Food Research International*, 150 (Part A), Article 110749. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2021.110749>
 17. Antunes, I. C., Bexiga, R., Pinto, C., Roseiro, L. C., Quaresma, M. A. G. (2022). Cow's milk in human nutrition and the emergence of plant-based milk alternatives. *Foods*, 12(1), Article 99. <https://doi.org/10.3390/foods12010099>
 18. Xu, M., Li, J., Yin, J., Wu, M., Zhou, W., Yang, X. et al. (2024). Color and nutritional analysis of ten different purple sweet potato varieties cultivated in China via principal component analysis and cluster analysis. *Foods*, 13(6), Article 904. <https://doi.org/10.3390/foods13060904>
 19. Stocco, G., Summer, A., Malacarne, M., Cecchinato, A., Bittante, G. (2019). Detailed macro- and micromineral profile of milk: Effects of herd productivity, parity, and stage of lactation of cows of dairy and dual-purpose breeds. *Journal of Dairy Science*, 102(11), 9727–9739. <https://doi.org/10.3168/jds.2019-16834>
 20. Cimmino, F., Catapano, A., Petrella, L., Villano, I., Tudisco, R., Cavaliere, G. (2023). Role of milk micronutrients in human health. *Frontiers in Bioscience-Landmark*, 28(2), Article 41. <https://doi.org/10.31083/j.fbl2802041>
 21. Aydogdu, T., O'Mahony, J. A., McCarthy, N. A. (2023). pH, the fundamentals for milk and dairy processing: A review. *Dairy*, 4(3), 395–409. <https://doi.org/10.3390/dairy4030026>
 22. Formaggioni, P., Franceschi, P. (2024). New insights into milk and dairy products: Quality and sustainability. *Foods*, 13(13), Article 1969. <https://doi.org/10.3390/foods13131969>
 23. San Julián, L., Fernández-Rico, S., González-Rodríguez, N., Cepeda, A., Miranda, J. M., Fente, C. et al. (2025). The role of dairy in human nutrition: Myths and realities. *Nutrients*, 17(4), Article 646. <https://doi.org/10.3390/nu17040646>
 24. Ścibisz, I., Ziarno, M. (2023). Effect of yogurt addition on the stability of anthocyanin during cold storage of strawberry, raspberry, and blueberry smoothies. *Foods*, 12(20), Article 3858. <https://doi.org/10.3390/foods12203858>
 25. Aslam, H., Marx, W., Rocks, T., Loughman, A., Chandrasekaran, V., Ruusunen, A. et al. (2020). The effects of dairy and dairy derivatives on the gut microbiota: A systematic literature review. *Gut Microbes*, 12(1), Article 1799533. <https://doi.org/10.1080/19490976.2020.1799533>
 26. Lv, M., Liu, X., Chen, K., Aihaiti, A., Maimaitiyming, R., Xing, J. et al. (2023). Effects of adding milk to fermented black mulberry (*Morus nigra* L.) juice on its antioxidant activity in C2C12 cells and changes in volatile flavor compounds during storage. *Food Chemistry: X*, 20, Article 101029. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2023.101029>
 27. Turkmen, N., Akal, C., Özer, B. (2019). Probiotic dairy-based beverages: A review. *Journal of Functional Foods*, 53, 62–75. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2018.12.004>
 28. Santaş, S., Mondragon Portocarrero, A. D. C., Miranda, J. M., Witkowska, A. M., Karav, S. (2024). Functional yogurt: Types and health benefits. *Applied Sciences*, 14(24), Article 11798. <https://doi.org/10.3390/app142411798>
 29. Alam, M. K., Prete, R., Faieta, M., Rannou, C., Prost, C., Lethuaut, L. et al. (2025). Yogurt volatile compounds as affected by processing and compositional factors: A review. *Trends in Food Science and Technology*, Article 104921. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2025.104921>
 30. Arab, M., Yousefi, M., Khanniri, E., Azari, M., Ghasemzadeh-Mohammadi, V., Mollakhali-Meybodi, N. (2023). A comprehensive review on yogurt syneresis: Effect of processing conditions and added additives. *Journal of Food Science and Technology*, 60(6), 1656–1665. <https://doi.org/10.1007/s13197-022-05403-6>
 31. Campos, L., Tuma, P., Silva, T., Gomes, D., Pereira, C. D., Henriques, M. H. F. (2024). Low-fat yoghurts are produced with different protein levels and alternative natural sweeteners. *Foods*, 13(2), Article 250. <https://doi.org/10.3390/foods13020250>
 32. El Bouchikhi, S., Pagès, P., El Alaoui, Y., Ibrahim, A., Bensouda, Y. (2019). Syneresis investigations of lacto-fermented sodium caseinate in a mixed model yogurt. *BMC Biotechnology*, 19(1), Article 57. <https://doi.org/10.1186/s12896-019-0539-1>
 33. Anuyahong, T., Chusak, C., Adisakwattana, S. (2020). Incorporation of anthocyanin-rich riceberry rice in yogurts: Effect on physicochemical properties, anti-oxidant activity and in vitro gastrointestinal digestion. *LWT*, 129, Article 109571. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109571>
 34. Gilbert, A., Rioux, L.-E., St-Gelais, D., Turgeon, S. L. (2020). Characterization of syneresis phenomena in stirred acid milk gel using low frequency nuclear magnetic resonance on hydrogen and image analyses. *Food Hydrocolloids*, 106, Article 105907. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.105907>
 35. Sadiq, U., Gill, H., Chandrapala, J. (2021). Casein micelles as an emerging delivery system for bioactive food components. *Foods*, 10(8), Article 1965. <https://doi.org/10.3390/foods10081965>
 36. Nieuwenhuijse, H., Huppertz, T. (2022). Heat-induced changes in milk salts: A review. *International Dairy Journal*, 126, Article 105220. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2021.105220>
 37. Wang, Y., Xiao, R., Liu, S., Wang, P., Zhu, Y., Niu, T. et al. (2024). The impact of thermal treatment intensity on proteins, fatty acids, macro/micro-nutrients, flavor, and heating markers of milk — A comprehensive review. *International Journal of Molecular Sciences*, 25(16), Article 8670. <https://doi.org/10.3390/ijms25168670>
 38. Lykkegaard, T., Corredig, M. (2023). Novel details on the dissociation of casein micelle suspensions as a function of pH and temperature. *Journal of Dairy Science*, 106(12), 8368–8374. <https://doi.org/10.3168/jds.2023-23456>
 39. Runthala, A., Mbye, M., Ayyash, M., Xu, Y., Kamal-Eldin, A. (2023). Caseins: Versatility of their micellar organization in relation to the functional and nutritional properties of milk. *Molecules*, 28(5), Article 2023. <https://doi.org/10.3390/molecules28052023>
 40. Sharma, S., Singh, R. K. (2023). Effect of atmospheric cold plasma treatment on acid gelation properties of skim milk: Rheology and textural studies. *Food Research International*, 172, Article 113212. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.113212>
 41. Lin, L., Wong, M., Deeth, H. C., Oh, H. E. (2020). Calcium-induced skim milk gels: Impact of holding temperature and ionic strength. *International Dairy Journal*, 104, Article 104657. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2020.104657>
 42. Wijegunawardhana, D., Wijesekara, I., Liyanage, R., Truong, T., Silva, M., Chandrapala, J. (2024). Process-induced molecular-level protein–carbohydrate–polyphenol interactions in milk-tea blends: A review. *Foods*, 13(16), Article 2489. <https://doi.org/10.3390/foods13162489>
 43. Xiang, J., Liu, F., Wang, B., Chen, L., Liu, W., Tan, S. (2021). A literature review on maillard reaction based on milk proteins and carbohydrates in food and pharmaceutical products: advantages, disadvantages, and avoidance strategies. *Foods*, 10(9), Article 1998. <https://doi.org/10.3390/foods10091998>
 44. Ono, W., Ando, H., Hayashi, M., Onuma, K., Oka, D., Noguchi, T. (2025). Effect of powdering process of low-heat skim milk powder on rennet-induced gelation and syneresis behaviour. *International Dairy Journal*, 169, Article 106345. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2025.106345>
 45. Scott, G., Awika, J. M. (2023). Effect of protein–starch interactions on starch retrogradation and implications for food product quality. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 22(3), 2081–2111. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.13141>
 46. Verfaillie, D., Li, J., Janssen, F., Blontrock, E., Van Royen, G., Wouters, A. G. B. (2024). Relating the protein denaturation degree and solubility of soy protein isolates to the structure of high moisture extrudates. *Food Hydrocolloids*, 155, Article 110211. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2024.110211>
 47. Mahomud, M. S., Haque, M. A., Akhter, N., Asaduzzaman, M. (2021). Effect of milk pH at heating on protein complex formation and ultimate gel properties of free-fat yoghurt. *Journal of Food Science and Technology*, 58(5), 1969–1978. <https://doi.org/10.1007/s13197-020-04708-8>
 48. Kowalik, J., Tarapata, J., Lobacz, A., Zulewska, J. (2024). Properties of rennet gels from retentate produced by cold microfiltration of heat-treated and microfiltered skim milk. *Foods*, 13(20), Article 3296. <https://doi.org/10.3390/foods13203296>
 49. Nagaraj, V., Upadhyay, N., Nath, B. S., Singh, A. K. (2018). Advances in fractionation and analysis of milk carbohydrates. Chapter in a book: Technological approaches for novel applications in dairy processing. Intech, 2018. <https://doi.org/10.5772/intechopen.76312>
 50. Wu, J., Li, H., A'yun, Q., Sedaghat Doost, A., De Meulenaer, B. et al. (2021). Conjugation of milk proteins and reducing sugars and their potential application in the improvement of the heat stability of (recombined) evaporated milk. *Trends in Food Science and Technology*, 108, 287–296. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.01.019>
 51. Yu, Y., Fu, R., Jin, C., Gao, H., Han, L., Fu, B. et al. (2024). Regulation of milk fat synthesis: key genes and microbial functions. *Microorganisms*, 12(11), Article 2302. <https://doi.org/10.3390/microorganisms12112302>
 52. Maity, S., Bhat, A. H., Giri, K., Ambatipudi, K. (2020). BoMiProt: A database of bovine milk proteins. *Journal of Proteomics*, 215, Article 103648. <https://doi.org/10.1016/j.jprot.2020.103648>
 53. Le Ba, T., Dam, M. S., Nguyen, L. L. P., Baranyai, L., Kaszab, T. (2025). A review of processing techniques and rheological properties of yogurts. *Journal of Texture Studies*, 56(1), Article e70006. <https://doi.org/10.1111/jtxs.70006>
 54. Barone, G., O'Regan, J., Kelly, A. L., O'Mahony, J. A. (2021). Calcium fortification of a model infant milk formula system using soluble and insoluble calcium salts. *International Dairy Journal*, 117, Article 104951. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2020.104951>
 55. Corredig, M., Nair, P. K., Li, Y., Eshpari, H., Zhao, Z. (2019). Invited review: Understanding the behavior of caseins in milk concentrates. *Journal of Dairy Science*, 102(6), 4772–4782. <https://doi.org/10.3168/jds.2018-15943>
 56. Dimpler, J., Huppertz, T., Kulozik, U. (2020). Invited review: Heat stability of milk and concentrated milk: Past, present, and future research objectives. *Journal of Dairy Science*, 103(12), 10986–11007. <https://doi.org/10.3168/jds.2020-18605>
 57. Santos, C., Raymundo, A., Moreira, J. B., Prista, C. (2025). Exploring the potential of lactic acid bacteria fermentation as a clean label alternative for use in yogurt production. *Applied Sciences*, 15(5), Article 2686. <https://doi.org/10.3390/app15052686>
 58. Akshat, F. N. U., Mao, T., Poojary, S., Chelikani, V., Mohan, M. S. (2025). Evaluating a novel hydrocolloid alternative for yogurt production: Rheological,

- microstructural, and sensory properties. *Foods*, 14(13), Article 2252. <https://doi.org/10.3390/foods14132252>
59. Altamimi, A. (2018). Extraction and optimization of potato starch and its application as a stabilizer in yogurt manufacturing. *Foods*, 7(2), Article 14. <https://doi.org/10.3390/foods7020014>
 60. Zhu, Y., Koutchma, T., Warriner, K., Zhou, T. (2014). Reduction of patulin in apple juice products by UV light of different wavelengths in the UVC range. *Journal of Food Protection*, 77(6), 963–971. <https://doi.org/10.4315/0362-028X.JFP-13-429>
 61. Javed, F., Tehseen, S., Ashfaq, F., Sameen, A., Khalid, W., Batool, R. et al. (2024). Stabilization of *Ficus carica* L. drink by utilizing varying levels of ultrasound-assisted moringa extract as a natural preservative. *Ultrasonics Sonochemistry*, 111, Article 107133. <https://doi.org/10.1016/j.ulsonch.2024.107133>
 62. Chen, S.-Y., Xu, C.-Y., Mazhar, M. S., Naiker, M. (2024). Nutritional value and therapeutic benefits of dragon fruit: A comprehensive review with implications for establishing Australian industry standards. *Molecules*, 29(23), Article 5676. <https://doi.org/10.3390/molecules29235676>
 63. Hossein Maleki, M., Daneshnia, M., Latifi, Z., Pirouz Zarrin, Y., Behzadnia, M., Morakabati, N. (2022). Evaluating the potential of phytochemicals as natural substitute for synthetic antioxidant: A review. *Asian Journal of Research in Biochemistry*, 10(1), 36–62. <https://doi.org/10.9754/ajrb/2022/v10i130214>
 64. Baran, A., Sulukan, E., Türkoglu, M., Ghosigharehagaji, A., Yildirim, S., Kankaynar, M. et al. (2020). Is sodium carboxymethyl cellulose (CMC) really completely innocent? It may be triggering obesity. *International Journal of Biological Macromolecules*, 163, 2465–2473. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.09.169>
 65. Dereje, B., Girma, A., Mamo, D., Chalchisa, T. (2020). Functional properties of sweet potato flour and its role in product development: A review. *International Journal of Food Properties*, 23(1), 1639–1662. <https://doi.org/10.1080/10942912.2020.1818776>
 66. Histifarina, D., Purnamasari, N. R., Rahmat, R. (February 15–16, 2023). Potential development and utilization of sweet potato flour as a raw material for the food industry. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 1230(1), Article 012006. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1230/1/012006>
 67. Ivane, N. M. A., Wang, W., Ma, Q., Wang, J., Sun, J. (2024). Harnessing the health benefits of purple and yellow-fleshed sweet potatoes: Phytochemical composition, stabilization methods, and industrial utilization- A review. *Food Chemistry: X*, 23, Article 101462. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2024.101462>
 68. Nurdjanah, S., Nurdin, S. U., Astuti, S., Manik, V. E. (2022). Chemical components, antioxidant activity, and glycemic response values of purple sweet potato products. *International Journal of Food Science*, 2022(2), Article 7708172. <https://doi.org/10.1155/2022/7708172>
 69. Ngoma, K., Mashau, M. E., Silungwe, H. (2019). Physicochemical and functional properties of chemically pretreated ndou sweet potato flour. *International Journal of Food Science*, 2019, Article 4158213. <https://doi.org/10.1155/2019/4158213>
 70. Hu, H., Zhou, X.-Y., Wang, Y.-S., Zhang, Y.-x., Zhou, W.-H., Zhang, L. (2023). Effects of particle size on the structure, cooking quality and anthocyanin diffusion of purple sweet potato noodles. *Food Chemistry: X*, 18, Article 100672. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2023.100672>
 71. Jia, S., Zhao, H., Tao, H., Yu, B., Liu, P., Cui, B. (2022). Influence of corn resistant starches type III on the rheology, structure, and viable counts of set yogurt. *International Journal of Biological Macromolecules*, 203, 10–18. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.01.027>
 72. Shrivastava, A., Gupta, R. K., Srivastav, P. P. (2024). Exploring novel frontiers of advancements in purple yam (*Dioscorea alata* L.) starch extraction, modification, characterization, applications in food and other industries. *Measurement: Food*, 15, Article 100196. <https://doi.org/10.1016/j.meafoo.2024.100196>
 73. Sudheesh, C., Varsha, L., Sunooj, K. V., Pillai, S. (2024). Influence of crystalline properties on starch functionalization from the perspective of various physical modifications: A review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 280(Part 4), Article 136059. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.136059>
 74. Dobson, S., Laredo, T., Marangoni, A. G. (2022). Particle filled protein-starch composites as the basis for plant-based meat analogues. *Current Research in Food Science*, 5, 892–903. <https://doi.org/10.1016/j.crfs.2022.05.006>
 75. Yan, X., McClements, D. J., Luo, S., Liu, C., Ye, J. (2024). Recent advances in the impact of gelatinization degree on starch: Structure, properties and applications. *Carbohydrate Polymers*, 340(4), Article 122273. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2024.122273>
 76. Yang, S., Hu, W., Qiao, S., Song, W., Tan, W. (2025). Advances in processing techniques and determinants of sweet potato starch gelatinization. *Foods*, 14(4), Article 545. <https://doi.org/10.3390/foods14040545>
 77. Tolve, R., Zanon, 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>
 78. Akal, C. (2023). Using dietary fiber as stabilizer in dairy products: β -glucan and inulin-type fructans. *Journal of Food Science and Technology*, 60(12), 2945–2954. <https://doi.org/10.1007/s13197-022-05651-6>
 79. Tang, C., Han, J., Chen, D., Zong, S., Liu, J., Kan, J. et al. (2023). Recent advances on the biological activities of purple sweet potato anthocyanins. *Food Bioscience*, 53, Article 102670. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2023.102670>
 80. Azeem, M., Mu, T.-H., Zhang, M. (2020). Effects of high hydrostatic pressure and soaking solution on proximate composition, polyphenols, anthocyanins, β -carotene, and antioxidant activity of white, orange, and purple fleshed sweet potato flour. *Food Science and Technology International*, 26(5), 388–402. <https://doi.org/10.1177/1082013219892716>
 81. da Cunha Júnior, P. C., Pinto, C.A.C., Saraiva, J.M.A., da Rocha Ferreira, E. H. (2025). Effects of purple-fleshed sweet potato lyophilized powder on the physicochemical properties, lactic acid bacteria viability, microstructure, and textural properties of stirred yogurt. *Foods*, 14(2), Article 257. <https://doi.org/10.3390/foods14020257>
 82. Julianti, E., Karo-Karo, T., Nabilah, L. (July 25–26, 2024). Functional and rheological characteristics of flour from 3 varieties of orange sweet potato. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 1413(1), Article 012065. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1413/1/012065>
 83. Bodjrenou, D. M., Li, X., Chen, W., Zhang, Y., Zheng, B., Zeng, H. (2022). Effect of pullulanase debranching time combined with autoclaving on the structural, physicochemical properties, and in vitro digestibility of purple sweet potato starch. *Foods*, 11(23), Article 3779. <https://doi.org/10.3390/foods11233779>
 84. Marta, H., Cahyana, Y., Bintang, S., Soeherman, G. P., Djali, M. (2022). Physicochemical and pasting properties of corn starch as affected by hydrothermal modification by various methods. *International Journal of Food Properties*, 25(1), 792–812. <https://doi.org/10.1080/10942912.2022.2064490>
 85. Sudjatinah, S., Wibowo, C. H., Putri, A. S. (2020). A Study on the utilization of purple sweet potato (*Ipomea batatas* L.) for ice cream as antioxidants. *Journal of Applied Food Technology*, 7(1), 01–04. <https://doi.org/10.17728/jaft.6098>
 86. da Cunha Júnior, P. C., de Carvalho Silva, M. T., Barbosa, M. I. M. J., da Rocha Ferreira, E. H. (2024). Application of lyophilized purple-fleshed sweet potato powder as a multifunctional ingredient in Greek yogurt. *Ciência Rural*, 54(03), Article e20220688. <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20220688>
 87. Kllinc, M., Akarca, G., Denizkara, A. J. (2025). Effect of lyophilized sweet potato on the quality and nutritional characteristics of set yogurt. *Food Science and Nutrition*, 13(3), Article e70111. <https://doi.org/10.1002/fsn3.70111>
 88. Ketaren, N. B., Hasanah, U., Agustien, A. (September 26–27, 2024). Physical quality of goat milk yogurt with the addition of pineapple and purple sweet potato. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 1302(1), Article 012102. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1302/1/012102>
 89. Saleh, A., Mohamed, A. A., Alamri, M. S., Hussain, S., Qasem, A. A., Ibraheem, M. A. (2020). Effect of different starches on the rheological, sensory and storage attributes of non-fat set yogurt. *Foods*, 9(1), Article 61. <https://doi.org/10.3390/foods9010061>
 90. Wijaya, H., Slay, A., Abdullah, N. (October 29–30, 2021). Ice cream products made from processed purple sweet potatoes: A product organoleptic study. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 807(4), Article 042074. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/807/4/042074>
 91. Warncke, M., Kieferle, I., Nguyen, T. M., Kulozik, U. (2022). Impact of heat treatment, casein/ whey protein ratio and protein concentration on rheological properties of milk protein concentrates used for cheese production. *Journal of Food Engineering*, 312, Article 110745. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2021.110745>
 92. Żulewska, J., Baranowska, M., Bielecka, M. M., Dąbrowska, A. Z., Tarapata, J., Kielczewska, K. et al. (2025). Effect of fortification with high-milk-protein preparations on yogurt quality. *Foods*, 14(1), Article 80. <https://doi.org/10.3390/foods14010080>
 93. Ahmed, S., Noor, A., Tariq, M., Zaidi, A. (2023). Functional improvement of synbiotic yogurt enriched with *Lactocaseibacillus rhamnosus* and *Aloe vera* gel using the response surface method. *Food Production, Processing and Nutrition*, 5(1), Article 38. <https://doi.org/10.1186/s43014-023-00153-0>
 94. Lesme, H., Rannou, C., Famelart, M.-H., Bouhallab, S., Prost, C. (2020). Yogurts enriched with milk proteins: Texture properties, aroma release and sensory perception. *Trends in Food Science and Technology*, 98, 140–149. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.02.006>
 95. Kumthekar, B., Temgire, S. S., Idete, A. B., Gaikwad, V. R. (2021). Effect of Supplementation on the Properties of Yogurt: A Review. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 10(4), 19–38. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2021.1004.003>
 96. Huang, Q., Huang, Q., Wang, Y., Lu, X. (2022). Development of wet media milled purple sweet potato particle-stabilized pickering emulsions: The synergistic role of bioactives, starch and cellulose. *LWT*, 155, Article 112964. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112964>
 97. Gao, F., Li, D., Li, H., Chen, H., Mao, X., Wang, P. (2023). Influence of post-heating treatment on the sensory and textural properties of stirred fermented milk. *Foods*, 12(16), Article 3042. <https://doi.org/10.3390/foods12163042>
 98. Cota-López, R., Velazquez, G., Méndez-Montealvo, G., Pérez-Ramírez, I. F., Murúa-Pagola, B., Espinoza-Mellado, E. et al. (2023). Effect of adding high concentrations of retrograded starch with different amylose content on the physicochemical properties and sensory attributes of Greek-style yogurt. *International Journal of Biological Macromolecules*, 241, Article 124501. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.124501>
 99. Deshwal, G. K., Tiwari, S., Kumar, A., Raman, R. K., Kadyan, S. (2021). Review on factors affecting and control of post-acidification in yoghurt and related products. *Trends in Food Science and Technology*, 109, 499–512. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.01.057>
 100. Guénard-Lampron, V., St-Gelais, D., Villeneuve, S., Turgeon, S. L. (2020). Short communication: Effect of stirring operations on changes in physical and rheological properties of nonfat yogurts during storage. *Journal of Dairy Science*, 103(1), 210–214. <https://doi.org/10.3168/jds.2019-16434>
 101. Anwar, A., Faiz, M. A., Badar, I. H., Jaspal, M. H., Hou, J. (2025). Influence of fermentation time and storage conditions on the physicochemical properties of different yogurt varieties using starter cultures and probiotic *Lactobacillus rhamnosus* GG. *Processes*, 13(3), Article 759. <https://doi.org/10.3390/pr13030759>
 102. Sigalingging, D., Sinaga, H., Yusraini, E. (October 8, 2020). Utilization of purple sweet potato as a partial substitute glutinous rice flour in the ombus-ombus cake from North Tapanuli traditional food. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 782(3), Article 032105. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/782/3/032105>
 103. Mu, T.-H., Li, P.-G. (2019). Sweet potato: Origin and production. Chapter in a book: Sweet Potato. Elsevier, 2019. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813637-9.00002-8>
 104. Aschemann-Witzel, J., Varela, P., Peschel, A. O. (2019). Consumers' categorization of food ingredients: Do consumers perceive them as 'clean label' producers expect? An exploration with projective mapping. *Food Quality and Preference*, 71, 117–128. <https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2018.06.003>
 105. Arsa, I. G. B. A., Mau, Y. S., Ndiwa, A. S. S., Gandut, Y. R. Y., Ishaq, L. F., Mahayasa, I. N. W. (2024). Yield performance and anthocyanin content of several purple-fleshed sweet potato clones grown in two locations in East Nusa Tenggara, Indonesia. *Biodiversitas Journal of Biological Diversity*, 25(5), 2276–2289. <https://doi.org/10.13057/biodiv/d250546>

106. Rozi, F., Prasetyaswati, N., Elisabeth, D. A. A. (March 9, 2021). Study on sweet potato market behaviour in supporting food security. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 756(1), Article 012082. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/756/1/012082>
107. Silvana Arianti, Y., Wahyu Harinta, Y. (November 7–8, 2019). *Sweet potatoes: Development and potential as alternative food ingredients in Karanganyar Regency, Indonesia*. *E3S Web of Conferences*, 226, Article 00050. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202122600050>

AUTHOR INFORMATION	СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ
Affiliation	Принадлежность к организации
<p>Andi Juliana, Student, Animal Science and Technology Study Program, Faculty of Animal Science, Hasanuddin University. Jl. Perintis Kemerdekaan, Km. 10, Makassar, 90245, Indonesia E-mail: andijuliana1701@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0001-2052-6726</p>	<p>Джулиана А. — студент, учебная программа по зоотехнии и технологиям, факультет зоотехнии, Университет Хасануддина 90245, Индонезия, Южный Сулавеси, Макаassar, Тамаланреа, ул. Перинис Кемердекаан, 10 км E-mail: andijuliana1701@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0001-2052-6726</p>
<p>Fatma Maruddin, Lecturer, Faculty of Animal Science, Hasanuddin University. Jl. Perintis Kemerdekaan, Km. 10. Makassar, 90245, Indonesia E-mail: fatma_maruddin@unhas.ac.id ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7976-0728 * corresponding author</p>	<p>Маруддин Ф. — преподаватель, факультет зоотехнии, Университет Хасануддина 90245, Индонезия, Южный Сулавеси, Макаassar, Тамаланреа, ул. Перинис Кемердекаан, 10 км E-mail: fatma_maruddin@unhas.ac.id ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7976-0728 * автор для контактов</p>
<p>Wahniyathi Hatta, Lecturer, Faculty of Animal Science, Hasanuddin University, Jl. Perintis Kemerdekaan Km 10. Makassar, 90245, Indonesia E-mail: wahnihatta@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0640-9483</p>	<p>Хатта В. — преподаватель, факультет зоотехнии, Университет Хасануддина 90245, Индонезия, Южный Сулавеси, Макаassar, Тамаланреа, ул. Перинис Кемердекаан, 10 км E-mail: wahnihatta@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0640-9483</p>
Contribution	Критерии авторства
The author has the sole responsibility for writing the manuscript and is 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/10.21323/2618-9771-2025-8-4-566-575>



Поступила 20.10.2025

Поступила после рецензирования 29.11.2025

Принята в печать 04.12.2025

© Дуганова А. Ю., Сорокина Н. П., Мамыкин Д. С.,
Семенова А. А., Рогов Г. Н., Беленко А. А., 2025

<https://www.fsjour.com/jour>

Научная статья
Открытый доступ

ДИФФЕРЕНЦИРОВАННАЯ ОЦЕНКА ФЕРМЕНТАТИВНОЙ АКТИВНОСТИ *LACTOCOCCUS* ДЛЯ СОЗДАНИЯ ЗАКВАСОК ПРЯМОГО ВНЕСЕНИЯ

Дуганова А. Ю.*, Сорокина Н. П., Мамыкин Д. С., Семенова А. А., Рогов Г. Н., Беленко А. А.

Федеральный научный центр пищевых систем им. В. М. Горбатова РАН, Углич — Москва — Санкт-Петербург, Россия

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: АННОТАЦИЯ

ферментированные
молочные продукты,
Lactococcus lactis,
ферментативная
активность,
ацидофикация,
закваски прямого
внесения

Представители рода *Lactococcus* являются одними из ключевых заквасочных микроорганизмов в молочной промышленности. Они играют ведущую роль в осуществлении молочнокислого брожения при выработке кисломолочных продуктов и сыров. В статье представлены результаты дифференцированной оценки ферментативной активности 9 штаммов *Lactococcus lactis* subsp. *lactis* в молоке при температуре культивирования (30 ± 1) °C, а также в процессе охлаждения и хранения при температуре (6 ± 1) °C в течение 21 суток. Все исследованные параметры кислотообразования (прирост титруемой кислотности в процессе ферментации и хранения) продемонстрировали статистически значимые различия между штаммами (ANOVA, $P < 0,05$). Наиболее выраженная вариативность штаммов наблюдалась по их способности подкислять молоко при хранении: снижение активной кислотности за 21 сутки составило от 0,19 до 0,49 ед. рН. Это может быть обусловлено их генетическими различиями в ферментативной активности и устойчивости к низким температурам, что требует дальнейшего изучения. Самая высокая активность при (30 ± 1) °C наблюдалась у четырех штаммов (663–12, 792–7, 618–5 и 549–1), которые повысили титруемую кислотность молока на 69–70 °T. Три из этих штаммов (792–7, 618–5 и 549–1) медленно накапливали кислоту при хранении, увеличив кислотность за 21 сутки на 4,7–7,3 °T. Штаммы 637–4 и 429–6 показали низкую скорость ферментации при оптимальной температуре (прирост кислотности составил 56,7 и 54,3 °T соответственно), но высокую — при хранении (прирост кислотности — 18,3 и 16,7 °T соответственно). Кластерный анализ методом Уорда и евклидовой метрики расстояния, выполненный в программной среде R4.3.1, позволил распределить изученные культуры *L. lactis* на три группы по характеру ферментативного профиля при температуре активной ферментации и в условиях хранения. Выделенные кластеры представляют собой различные метаболические профили, определяющие потенциальное применение штаммов в технологических процессах. Полученные результаты свидетельствуют, что для комплексной оценки кислотообразующей активности культур при подборе их в состав заквасок прямого внесения для кисломолочных продуктов и сыров необходимо исследовать как скорость кислотообразования, так и постферментативный потенциал.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Исследование выполнено при поддержке национального проекта по обеспечению технологического лидерства «Новые материалы и химия», тема FGUS-2025-0006.

Received 20.10.2025

Accepted in revised 29.11.2025

Accepted for publication 04.12.2025

© Duganova A. Yu., Sorokina N. P., Mamykin D. S.,
Semenova A. A., Rogov G. N., Belenko A. A., 2025

Available online at <https://www.fsjour.com/jour>

Original scientific article

Open access

DIFFERENTIATED ASSESSMENT OF *LACTOCOCCUS* ENZYMATIC ACTIVITY FOR THE CREATION OF STARTER CULTURES OF DIRECT APPLICATION

Anna Yu. Duganova*, Ninel P. Sorokina, Denis S. Mamykin,
Anastasia A. Semenova, Grigory N. Rogov, Andrey A. Belenko

V. M. Gorbатов Federal Scientific Center for Food Systems of the Russian Academy of Sciences,
Uglich — Moscow — Saint-Petersburg, Russia

KEYWORDS:

fermented dairy
products, *Lactococcus*
lactis, enzymatic
activity, acidification,
starter cultures of
direct application

ABSTRACT

Representatives of the genus *Lactococcus* are one of the key starter microorganisms in the dairy industry. They play a leading role in lactic acid fermentation in the production of fermented dairy products and cheeses. The article presents the results of a differentiated assessment of the enzymatic activity of nine strains of *Lactococcus lactis* subsp. *lactis* in milk at a cultivation temperature of (30 ± 1) °C, as well as during cooling and storage at a temperature of (6 ± 1) °C for 21 days. All studied parameters of acid formation (an increase in titratable acidity during fermentation and storage) demonstrated statistically significant differences between the strains (ANOVA, $P < 0.05$). The most pronounced variability of the strains was observed in their ability to acidify milk during storage: a decrease in the actual acidity over 21 days ranged from 0.19 to 0.49 pH units. This may be due to their genetic differences in enzymatic activity and resistance to low temperatures, which requires further study. The highest activity at (30 ± 1) °C was observed in four strains (663–12, 792–7, 618–5 and 549–1), which increased the titratable acidity of milk by 69–70 °T. Three of these strains (792–7, 618–5, and 549–1) slowly accumulated acid during storage, increasing the acidity by 4.7–7.3 °T over 21 days. Strains 637–4 and 429–6 showed a low fermentation rate at optimal temperature (an increase in acidity was 56.7 and 54.3 °T, respectively), but a high one during storage (an increase in acidity was 18.3 and 16.7 °T, respectively). Cluster analysis by the Ward method and the Euclidean distance metric performed in the R4.3.1 software environment allowed us to divide the studied *L. lactis* cultures into three groups according to the nature of the enzymatic profile at the temperature of active fermentation and under the storage conditions. The isolated clusters represent

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Дуганова, А. Ю., Сорокина, Н. П., Мамыкин, Д. С., Семенова, А. А., Рогов, Г. Н., Беленко, А. А. (2025). Дифференцированная оценка ферментативной активности *Lactococcus* для создания заквасок прямого внесения. *Пищевые системы*, 8(4), 566–575. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-4-566-575>

FOR CITATION: Duganova, A. Yu., Sorokina, N. P., Mamykin, D. S., Semenova, A. A., Rogov, G. M., Belenko, A. A. (2025). Differentiated assessment of *Lactococcus* enzymatic activity for the creation of starter cultures of direct application. *Food Systems*, 8(4), 566–575. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-4-566-575>

various metabolic profiles that determine the potential use of strains in technological processes. The results obtained indicate that for a comprehensive assessment of the acid-forming activity of cultures when selecting them for using in the composition of starter cultures of direct application for fermented dairy products and cheeses, it is necessary to study both the rate of acid formation and the post-enzymatic potential.

FUNDING: The research was performed within the contract of the national project for ensuring technological leadership “New Materials and Chemistry”, theme FGUS-2025-0006.

1. Введение

Ферментированные молочные продукты составляют значительную долю рынка функционального питания. Ферментация — это биохимический процесс преобразования молока под воздействием микроорганизмов, в ходе которого происходит сбраживание углеводов. В результате этого процесса присутствующие в молоке сахара метаболизируются лактобактериями в молочную кислоту, этанол и уксусную кислоту. Ферментация может осуществляться естественным образом за счет жизнедеятельности эндогенной микробиоты сырья или с помощью экзогенных, искусственно введенных микроорганизмов для достижения конкретных технологических эффектов [1,2]. При изготовлении ферментированных молочных продуктов из пастеризованного молока бактериальные закваски являются функционально необходимым компонентом. Качество, потребительские свойства и безопасность данных продуктов в значительной степени определяются составом и свойствами заквасочных культур. Исследование технологических свойств молочнокислых бактерий продолжает быть актуальным во всем мире [3–5].

Подбор культур для бактериальных заквасок является ключевым фактором, определяющим вкус, аромат, текстуру и срок годности продукта. Критерии подбора можно условно разделить на общие для всех видов ферментированной продукции (кислотообразующая активность, фагоустойчивость, органолептическая оценка) и специфические для отдельных видов молочной продукции, например, вязкость для кисломолочных напитков и сметаны или синергетическая способность для творога [6–8]. Кислотообразующую активность молочнокислых бактерий оценивают по продолжительности сквашивания молока, скорости увеличения титруемой или снижения активной кислотности, а также по предельной титруемой кислотности в молоке при оптимальной и минимальной температурах роста.

Изменяющиеся условия окружающей среды при развитии микроорганизмов в процессе выработки молочных продуктов оказывают существенное (абиотическое) влияние на скорость и характер их метаболизма. Следовательно, культуры должны быть активны в технологически заданном температурном диапазоне и обеспечивать безопасность и стабильность показателей качества на протяжении всего процесса производства и хранения продуктов. Разнообразие производственно-ценных свойств лактококков сформировалось в результате эволюционных процессов и горизонтального переноса генов, включая плазмиды, связанные с сахаролитической и протеолитической активностью, с продукцией ароматических соединений и с устойчивостью к бактериофагам [9]. Во многих странах используются как коммерческие закваски, состоящие из чистых культур с уникальными технологическими свойствами, так и местные штаммы молочнокислых бактерий, отобранные на основе продолжительного традиционного применения [10,11].

Для изготовления многих ферментированных молочных продуктов используются мезофильные или мезотермофильные поливидовые закваски, в составе которых содержатся лактококки. Они не обладают каталазной активностью, не образуют спор и являются факультативными анаэробами [12].

Лактококки являются гомоферментативными бактериями, и для них характерен тагатозо-6-фосфатный путь, при котором лактоза-6P гидролизует фосфо-β-галактозидазой до глюкозы и галактозы-6P. Конечными продуктами тагатозо-6-фосфата являются триозо-3-фосфаты, глицеральдегид-3-фосфат и дигидроксиацетон-фосфат, которые далее метаболизируются путем гликолиза с основным конечным продуктом ферментации — молочной кислотой [13]. Молочная кислота имеет два изомера: L-молочная кислота и D-молочная кислота. D-изомер молочной кислоты считается вредным для человека энантиомером, поскольку способен вызывать нарушения здоровья, в т. ч. дисбактериоз, воспалительные заболевания кишечника и другие [14]. Лактококки в результате гликолиза лактозы продуцируют L-молочную кислоту [15,16]. Молочная кислота, образующаяся в анаэробных условиях на протяжении всего гликолитического пути, придает кисловатый вкус ферментированным продуктам, таким как простокваши, йогурт, сметана [1,3,10].

Температурный диапазон для мезофильных культур рода *Lactococcus* составляет 25–35 °C [12]. Лактококки видов *Lactococcus lactis* subsp. *lactis* (далее — *L. lactis*) и *Lactococcus cremoris* (далее — *L. cremoris*) являются основными мезофильными кислотообразующими бактериями в производстве широкого спектра ферментированных молочных продуктов: творога, сметаны, простокваш, большинства видов сыров. *L. cremoris* ранее считался подвигом *L. lactis* и назывался *Lactococcus lactis* subsp. *cremoris*, но недавно он был выделен в самостоятельный вид *Lactococcus cremoris* [17]. Микроорганизмы этих двух видов лактококков имеют различия по наличию генов, ответственных за метаболизм углеводов и аминокислот [18], а также по-разному реагируют на стресс [19].

Основная роль лактококков при изготовлении ферментированных молочных продуктов заключается именно в подкислении, которое зависит от эффективного метаболизма лактозы. *L. lactis* является интенсивным кислотообразователем, быстро снижает pH среды, что критически важно для формирования плотного сгустка и подавления посторонней микрофлоры. *L. cremoris* обладает более контролируемым кислотообразованием и придает продуктам чистый, мягкий, сливочный кисломолочный вкус [2,10]. Лактококки формируют текстуру кисломолочных продуктов, которая определяется изменением физико-химических свойств молочных белков в результате подкисления, а также продуцированием лактококками внеклеточных полисахаридов, влияющих на реологические свойства молочных сгустков [16,20]. Утилизация лактозы у лактококков часто кодируется плазмидами, в частности метаболизм лактозы *L. lactis* и *L. cremoris* контролируется опероном *lac* в составе плазмид. Р. Kelleher с соавторами [21] было обнаружено присутствие оперона *lac* на плазмидах в 24 штаммах из 26 исследованных. Два других штамма имели альтернативные методы метаболизма лактозы.

Одним из критических параметров при создании заквасочных консорциумов является кислотообразующий потенциал, который определяется видовым и штаммовым составом. Молочнокислые бактерии должны быстро сбраживать лактозу с образованием молочной кислоты, что обуславливает основной процесс ферментации. Нарастание кислотности определяет продолжительность производственных процессов и ингибирует рост технически вредной и патогенной микробиоты [22,23].

В кисломолочном производстве нарастание кислотности после завершения ферментации в процессе охлаждения и фасования продукции при изготовлении кисломолочных продуктов резервуарным способом, а также холодильного хранения при температуре 2–6 °C представляет значительную проблему для производителей ферментированной молочной продукции. Активность заквасочных микроорганизмов приводит к нежелательным изменениям в продукте: ухудшению органолептических свойств, излишнему подкислению, изменению реологических характеристик [6]. Остаточная постферментативная метаболическая активность продолжается с разной интенсивностью, как правило, в течение всего периода охлаждения и хранения, что выражается в повышении кислотности, появлении неприятного излишне кислого вкуса, уплотнении или разжижении сгустка, образовании сыворотки на поверхности продуктов. Появляются дефекты вкуса и аромата из-за продолжающегося протеолиза и липолиза, иногда может наблюдаться горький привкус в результате распада казеина до горьких пептидов, а также нежелательное газообразование в готовых продуктах [24].

В сыроделии при изготовлении полутвердых и твердых сыров после окончания обработки сырного зерна в сыроизготовителе происходит постепенное снижение температуры сырной массы в ходе формования и прессования сырных головок. Также наблюдается достаточно быстрое снижение температуры сырной массы в соильном бассейне, температура рассола в котором, как правило, составляет 10–12 °C. В сырной массе имеется определенное количество несброженной лактозы, которое зависит от вида сыра и состава заквасочного микробиома, и в отличие от кисломолочных продуктов вся лактоза должна быть сброжена молочнокислыми бактериями для предотвращения роста посторонних микроорганизмов. В частности, в полутвердых сырах лактоза полностью сбраживается

к 10–15 суткам созревания [8,25], следовательно, в сыроделии активность заквасочных микроорганизмов при низкой температуре созревания имеет важное значение. Следует отметить, что лактококки также играют центральную роль в формировании вкуса созревающих сычужных сыров за счет внеклеточного протеолиза молочных белков [26,27].

Штаммы молочнокислых бактерий обладают различной кислотообразующей активностью при изменении температуры культивирования [28]. Часть из них характеризуются высокой скоростью кислотообразования и продолжает активно функционировать даже при пониженных температурах, а некоторые реагируют на понижение температуры существенным торможением скорости метаболизма лактозы. Скорость метаболизма лактококковых заквасок в значительной мере определяется индивидуальными характеристиками штаммов, но не их видовой принадлежностью [29]. Поэтому важным аспектом подбора штаммов является дифференцированная оценка кислотообразующей активности заквасочных культур с учетом технологических режимов выработки ферментированных молочных продуктов, включая постферментативную активность.

Ключевым методом подбора культур в закваски для кисломолочных продуктов с длительными сроками годности следует считать скрининг активных при оптимальных температурах штаммов, но с низкой постферментативной активностью. Такие культуры быстро набирают необходимую кислотность, однако затем в условиях охлаждения их метаболическая активность снижается. Быстрое и своевременное снижение температурных режимов после завершения ферментации значительно замедляет все метаболические процессы [22]. Проблема постферментативной активности — это управляемый фактор. Ее успешное решение напрямую зависит от правильного выбора заквасочных культур и строгого контроля технологических параметров на всех этапах производства, от сквашивания до хранения. Это позволяет обеспечить стабильно высокое качество продукции на протяжении всего заявленного срока годности [24,30].

Одним из перспективных направлений в области пищевой биотехнологии является создание инновационных биотехнологических методов для селекции штаммов молочнокислых бактерий, а также микробных консорциумов с predeterminedными биологическими характеристиками для обеспечения оптимальных параметров технологического процесса [31]. Учитывая критическую важность молочнокислого брожения как фактора обеспечения безопасности и качества различных видов ферментированной молочной продукции, при создании эффективных отечественных заквасок прямого внесения необходимо обеспечить контролируемую скорость ферментации и стабильность технологических параметров с учетом кислотообразующей активности штаммов лактококков.

Цель данного исследования — дифференцированная оценка кислотообразующей активности коллекционных культур *Lactococcus lactis* subsp. *lactis* для выявления штаммов с уникальными технологическими профилями и их кластерный анализ для последующего целенаправленного формирования заквасочных консорциумов с заданными свойствами.

2. Материалы и методы

Объектами исследования являлись 9 штаммов лактококков *L. lactis* из «Коллекции молочнокислых бактерий для производства сычужных сыров и бактериофагов к ним» Биоресурсного центра ФГБНУ «ФНЦ пищевых систем им. В. М. Горбатова» РАН со следующими номерами: 429–6, 463–3–6, 738–2–3, 792–7, 618–5, 549–1, 703–2, 637–4, 663–12.

Подготовку культур к исследованию и изучение кислотообразующей активности проводили путем культивирования в 10% восстановленном стерильном обезжиренном молоке, приготовленном из сухого обезжиренного молока (СОМ) (ГОСТ 52791-2007¹). Доза инокулята составляла 3% 16-часовой молочной культуры.

Титруемую кислотность молока определяли по ГОСТ Р 54669-2011² «Молоко и продукты переработки молока. Методы определения кислотности». Активную кислотность молока измеряли потенциометрическим методом по ГОСТ 32892-2014³ «Молоко и молочная продукция. Метод измерения активной кислотности» с помощью рН-метра STARTER2100 с пределом погрешности $\pm 0,01$ ед. рН (ОНАУС, Китай).

¹ ГОСТ 52791-2007 «Консервы молочные. Молоко сухое. Технические условия». М.: Стандартинформ, 2008. — 10 с.

² ГОСТ Р 54669-2011 «Молоко и продукты переработки молока. Методы определения кислотности». М.: Стандартинформ, 2013. — 10 с.

³ ГОСТ 32892-2014 «Молоко и молочная продукция. Метод измерения активной кислотности». М.: Стандартинформ, 2015. — 10 с.

С целью моделирования многоступенчатых температурных режимов производства кисломолочной продукции штаммы культивировали в течение 6 ч при температуре $(30 \pm 1)^\circ\text{C}$, охлаждали в течение 2 ч до температуры $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$, затем доохлаждали до температуры $(6 \pm 1)^\circ\text{C}$ и хранили в течение 21 суток. Измерения титруемой и активной кислотности проводили после ферментации, включая период охлаждения до температуры $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$; после доохлаждения до температуры $(6 \pm 1)^\circ\text{C}$ и через каждые 7 суток в процессе хранения.

Эксперименты выполнены в трех независимых повторностях. Статистическую обработку данных проводили с использованием стандартных методов математической статистики с помощью прикладной программы Microsoft Excel и программной среды R4.3.1, достоверность различий оценивали при уровне значимости $p < 0,05$.

Для статистического анализа и предварительной группировки экспериментальных данных применялась кластеризация методом равных интервалов, выполненная в два этапа: расчет границ кластеров (MS Excel 2021) и последующее визуальное представление (MS Excel 2021). Алгоритм проведения первого этапа:

- определение диапазона экспериментальных данных через вычисление минимального (X_{\min}) и максимального (X_{\max}) значений;
- расчет величины интервала (h), по формуле $h = (X_{\max} - X_{\min})/3$, что соответствует выделению трех кластеров (низкие, средние и высокие значения);
- определение границ кластеров: первый кластер включает значения от X_{\min} до $X_{\min} + h$, второй — от верхней границы первого кластера до $X_{\min} + 2h$, третий — оставшиеся значения до X_{\max} ;
- на основе рассчитанных границ каждое экспериментальное значение было отнесено к соответствующему кластеру путем применения логических функций MS Excel (ЕСЛИ).

Для наглядного отображения границ между кластерами на полученную гистограмму вручную, с использованием инструментов рисования MS Excel, были добавлены вертикальные области, соответствующие рассчитанным границам. Данный подход использован исключительно для наглядной визуализации.

Иерархический кластерный анализ проводили с использованием метода Уорда и евклидовой метрики расстояния. Для верификации результатов дополнительно применялся метод k -средних с последующей визуализацией данных в виде тепловой карты. Вычисления выполнены в программной среде R4.3.1. Для проведения иерархического кластерного анализа и расчета матрицы расстояний использовался пакет cluster. Визуализация результатов, включая построение дендрограммы с выделенными кластерами и отображение кластеров в пространстве, осуществлялась с помощью пакета factextra. Пакет ggplot2 применялся для создания итоговых графиков и их кастомизации в публикационном качестве.

Применение двух методов кластеризации являлось частью методологической стратегии, направленной на повышение достоверности и наглядности результатов. Метод равных интервалов использован на первоначальном этапе анализа, что позволило наглядно оценить потенциальную группировку наблюдений по разным показателям. Также метод равных интервалов применен для дополнительной визуализации в виде цветных областей на гистограммах. Иерархический кластерный анализ по методу Уорда применен на следующем этапе как основной и статистически более обоснованный метод, позволивший окончательно определить состав кластеров.

3. Результаты и обсуждение

Ключевым аспектом в производстве ферментированной молочной продукции является способность микроорганизмов обеспечивать основной процесс молочнокислого брожения, характеризующийся увеличением показателя титруемой кислотности. Этот показатель нормируется для кисломолочных продуктов как после сквашивания молока или сливок, так и в конце срока годности продуктов.

Представленные в Таблице 1 результаты исследования динамики титруемой кислотности штаммов *L. lactis* в условиях, имитирующих температурные и временные режимы в процессе выработки кисломолочных продуктов, свидетельствуют о различной кислотообразующей активности изученных культур. Отмечен высокий уровень молочнокислого брожения в период основной ферментации, обеспечивающий сквашивание молока при дозе инокулята 3% в течение 6 ч. Прирост титруемой кислотности составил от $49,0^\circ\text{T}$ до $61,0^\circ\text{T}$, с максимальными значениями титруемой кислотности после сквашивания в диапазоне от $68,33^\circ\text{T}$ до $80,33^\circ\text{T}$. Эти показатели соответствуют биохимическим характеристикам данного подвида, известного своей способностью к быстрому повышению кислотности среды, что имеет ключевое значение для формирования плотного

Таблица 1. Динамика изменения титруемой кислотности штаммов *L. lactis*Table 1. Dynamics of changes in the titratable acidity of *L. lactis* strains

№ штамма	Титруемая кислотность, °Т				
	после ферментации	после охлаждения до (6±1) °С	В процессе хранения, сут.		
			7	14	21
429-6	68,33±3,06	73,67±1,53	86,00±4,58	87,33±2,52	90,33±0,58
463-3-6	74,33±1,15	79,33±1,15	88,67±1,53	89,67±1,53	89,67±1,53
738-2-3	75,00±2,00	82,33±2,08	86,33±1,53	88,33±2,08	89,67±1,53
792-7	80,33±1,53	89,33±1,15	90,33±1,53	91,33±1,53	94,00±2,00
618-5	77,33±3,06	88,33±1,15	90,33±2,52	91,67±1,53	93,33±1,15
549-1	78,33±1,53	88,33±5,69	89,67±2,52	93,00±2,65	95,67±0,58
703-2	79,00±1,73	82,33±1,15	90,67±1,53	98,67±0,58	102,33±0,58
637-4	74,00±5,29	76,00±5,29	76,67±1,53	87,33±1,15	94,33±1,15
663-12	73,67±1,53	93,00±1,00	96,00±3,00	101,00±1,73	102,67±1,15

Примечание: титруемая кислотность молока составляла 19,33 °Т, исходная концентрация клеток лактококков — $(2,83 \pm 0,21) \times 10^7$ КОЕ/см³. Результаты представлены в форме «среднее значение ± стандартное отклонение» ($n = 3$ биологические повторности).

сгустка и подавления роста нежелательных и технически вредных микроорганизмов [11,22]. В процессе охлаждения для изученных штаммов характерна еще более значительная вариативность — прирост кислотности в этот период колебался от 2,0 °Т до 19,3 °Т.

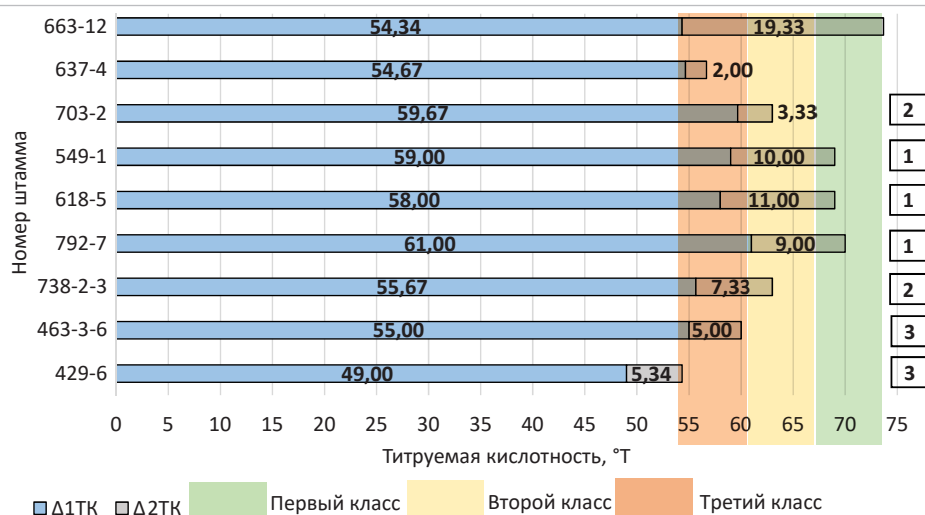
На основании полученных данных были рассчитаны приросты титруемой кислотности штаммов. В результате кластерного анализа методом равных интервалов построены горизонтальные диаграммы. На Рисунке 1 представлена динамика кислотообразования в процессе выработки и охлаждения молока, которая показала штаммовую специфичность *L. lactis* по интенсивности ферментации. К первому кластеру в данном случае отнесены культуры с высоким уровнем кислотообразования, а к третьему классу, соответственно, с самым низким уровнем (Таблица 2).

Особое внимание было уделено изучению постферментативной активности при холодильном хранении, поскольку данный параметр является критическим для обеспечения стабильного качества кисломолочных продуктов на протяжении всего срока годности и сбраживания лактозы при созревании сыров. Анализ динамики изменения титруемой кислотности в период длительного холодильного хранения в течение 21 суток при температуре (6±1) °С также показал значительные различия между штаммами (Рисунок 2 и Таблица 3).

К первому классу были отнесены штаммы с высокой постферментативной активностью, а к третьему классу — с низкой активностью.

При этом продуцирование молочной кислоты имело разную интенсивность в первую и каждые последующие недели хранения. Сравнивая штаммы 3 класса с высокой активностью, можно отметить, что *L. lactis* 703-2 проявлял активность в первую и вторую недели, а ее снижение наблюдалось лишь на третьей неделе. В то же время *L. lactis* 429-6 демонстрировал самую высокую активность из всех культур в первую неделю с резким снижением в последующие недели хранения. А штаммы 1 класса *L. lactis* 549-1, 618-5 и 792-7 демонстрировали низкую активность, начиная с первой недели и до конца хранения, причем штаммы 618-5 и 792-7 имели самый низкий уровень ацидофикации — всего 4,67 и 5,00 °Т за весь период хранения.

Изменение активной кислотности молока штаммами *L. lactis* в процессе ферментации, охлаждения и хранения (Рисунки 3-4, Таблицы 4-5) в целом имело сходную динамику. Небольшие различия были обусловлены принципиальными особенностями методов определения кислотности. Для изученных культур также была характерна существенная разница в снижении уровня активной кислотности молока, которая колебалась от 1,59 до 1,84 ед. рН после окончания ферментации и от 0,00 до 0,14 ед. рН во время охлаждения.



Примечание: Δ1TK — прирост титруемой кислотности за период ферментации; Δ2TK прирост титруемой кислотности за период охлаждения до (6±1) °С.

Рисунок 1. Прирост титруемой кислотности штаммов *L. lactis* в процессе ферментации и охлаждения
Figure 1. Increase in the titratable acidity of *L. lactis* strains during fermentation and cooling

Таблица 2. Статистические характеристики кластеров штаммов *L. lactis* по приросту титруемой кислотности за период ферментации и охлаждения

Table 2. Statistical characteristics of clusters of *L. lactis* strains in terms of an increase in the titratable acidity during fermentation and cooling

Параметр	Первый кластер	Второй кластер	Третий кластер
Расчетные границы, °Т	67,23–73,67	60,78–67,22	54,34–60,77
Количество элементов в кластере, шт.	4	2	3
Номера штаммов <i>L. lactis</i>	792-7, 618-5, 549-1, 663-12	738-2-3, 703-2	429-6, 463-3-6, 637-4
Среднее значение, °Т	70,42	63,00	57,00
Минимальное фактическое значение, °Т	69,00	63,00	54,34
Максимальное фактическое значение, °Т	73,67	63,00	60,00

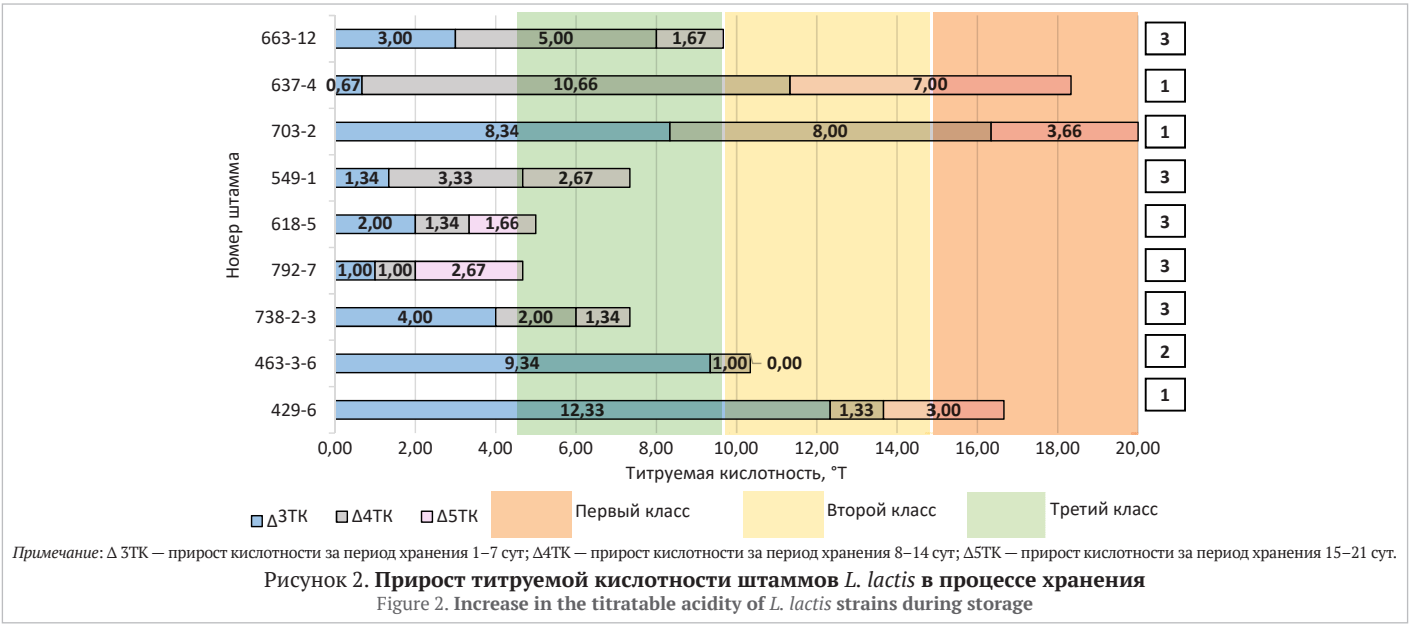


Таблица 3. Статистические характеристики кластеров штаммов *L. lactis* по приросту титруемой кислотности в процессе хранения в течение 21 суток

Table 3. Statistical characteristics of clusters of *L. lactis* strains in terms of an increase in the titratable acidity during storage for 21 days

Параметр	Первый кластер	Второй кластер	Третий кластер
Расчетные границы, °Т	14,89–20,00	9,78–14,88	4,67–9,77
Количество элементов в кластере, шт.	3	1	5
Номера штаммов <i>L. lactis</i>	429–6, 703–2, 637–4	463–3–6	738–2–3, 792–7, 618–5, 549–1, 663–12
Среднее значение, °Т	18,33	10,34	6,80
Минимальное фактическое значение, °Т	16,66	10,34	4,67
Максимальное фактическое значение, °Т	20,00	10,34	9,67

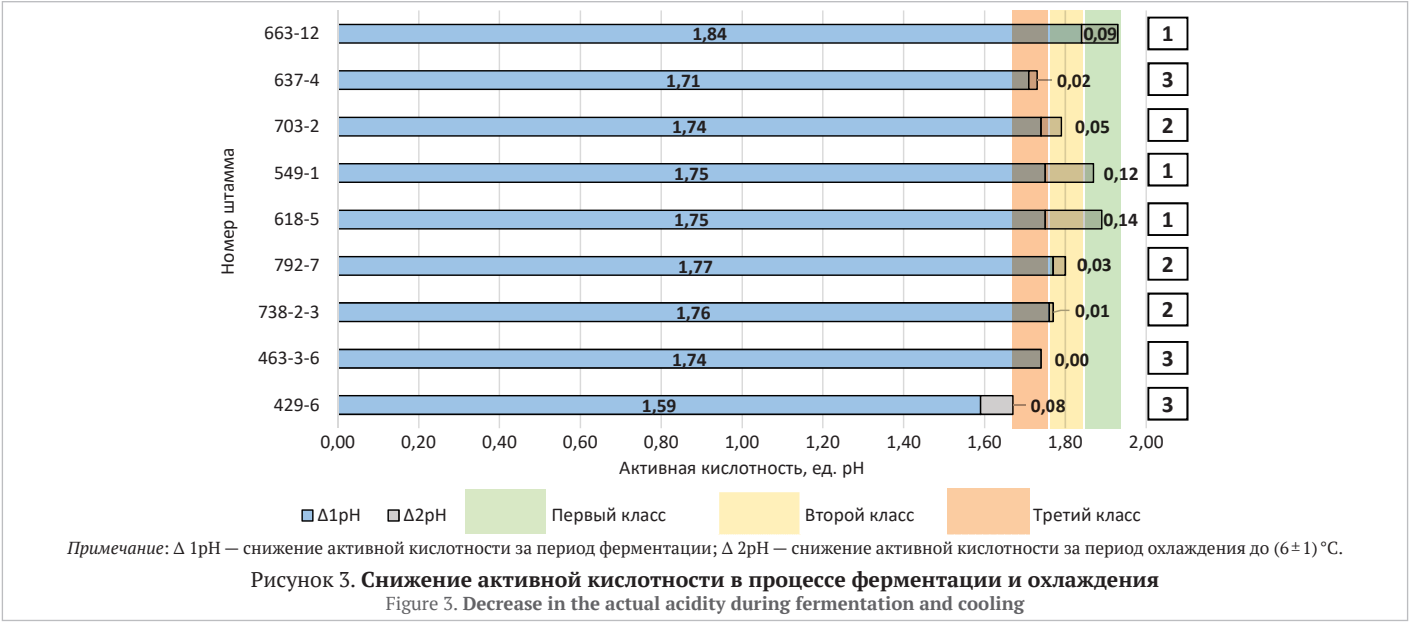
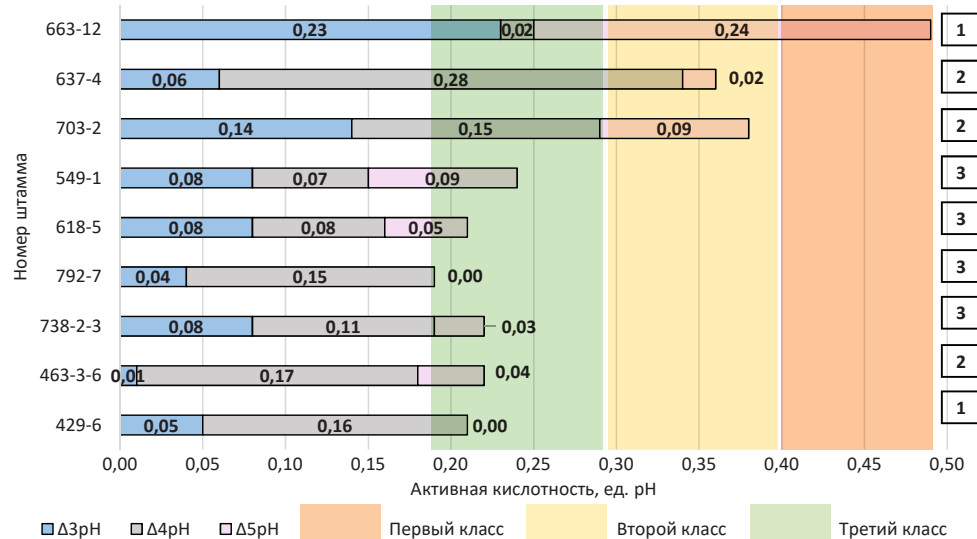


Таблица 4. Статистические характеристики кластеров штаммов *L. lactis* по снижению активной кислотности во время ферментации и охлаждения

Table 4. Statistical characteristics of clusters of *L. lactis* strains in terms of a decrease in the actual acidity during fermentation and cooling

Параметр	Первый кластер	Второй кластер	Третий кластер
Расчетные границы, °Т	1,85–1,93	1,76–1,84	1,67–1,75
Количество элементов в кластере, шт.	3	3	3
Номера штаммов <i>L. lactis</i>	618–5, 549–1, 663–12	738–2–3, 792–7, 703–2	429–6, 463–3–6, 637–4
Среднее значение, °Т	1,90	1,79	1,71
Минимальное фактическое значение, °Т	1,93	1,80	1,74
Максимальное фактическое значение, °Т	1,87	1,77	1,67



Примечание: Δ3pH — снижение активной кислотности за период хранения 1–7 сут; Δ4pH — снижение активной кислотности за период хранения 8–14 сут; Δ5pH — снижение активной кислотности за период хранения 15–21 сут.

Рисунок 4. Снижение активной кислотности во время хранения

Figure 4. Decrease in the actual acidity during storage

Таблица 5. Статистические характеристики кластеров штаммов *L. lactis* по снижению активной кислотности в процессе хранения в течение 21 суток

Table 5. Statistical characteristics of clusters of *L. lactis* strains in terms of a decrease in the actual acidity during storage for 21 days

Параметр	Первый кластер	Второй кластер	Третий кластер
Расчетные границы, °Т	0,40–0,49	0,30–0,39	0,19–0,29
Количество элементов в кластере, шт.	1	2	6
Номера штаммов <i>L. lactis</i>	663–12	703–2, 637–4	429–6, 463–3–6, 738–2–3, 792–7, 618–5, 549–1
Среднее значение, °Т	0,49	0,37	0,22
Минимальное фактическое значение, °Т	0,49	0,36	0,19
Максимальное фактическое значение, °Т	0,49	0,38	0,24

Еще более вариативным, как и в случае с титруемой кислотностью, был темп снижения активной кислотности в процессе длительного хранения. Суммарное снижение активной кислотности за 21 сутки находилось в диапазоне от 0,19 до 0,49 ед. pH.

Достоверность различий кислотообразующей активности между штаммами подтверждена статистическими результатами однофакторного ANOVA ($p < 0,05$), представленного в Таблице 6.

Таблица 6. Результаты однофакторного ANOVA

Table 6. Results of one-way ANOVA

Параметр	Сумма квадратов (SS)	Степени свободы (df)	Средний квадрат (MS)	F-критерий	P-значение	F-критическое
Прирост кислотности за период ферментации	476,12	8	59,515	7,892	0,00018	2,355
Прирост кислотности при хранении	428,37	8	53,546	12,734	0,000003	2,355
Снижение pH за период ферментации	0,124	8	0,0155	4,327	0,0052	2,355
Снижение pH при хранении	0,148	8	0,0185	15,625	0,000001	2,355

Все исследованные параметры кислотообразующей активности демонстрируют статистически значимые различия между штаммами. Для прироста титруемой кислотности во время выработки (P -значение = 0,00018). Для постферментативной активности в процессе хранения различия более выражены, чем во время ферментации (P -значение = 0,000003). Обнаружены статистически значимые различия между штаммами по снижению активной кислотности во время хранения ($p < 0,05$). Отмеченные различия более выражены на фоне всех остальных проанализированных параметров ферментативной активности исследованных культур.

Результаты теста Тьюки (Таблица 7) выявили достоверные различия ($p < 0,05$) между штаммами *L. lactis* по показателям кислотообразующей активности во время выработки и хранения. Согласно результатам анализа методом Тьюки, буквенные обозначения указывают на статистически однородные группы, где штаммы с одинаковыми буквами не имеют достоверных различий между собой ($p > 0,05$), а штаммы с разными буквами статистически значимо различаются. Анализ выявил сложную картину статистических взаимосвязей между штаммами. Штамм 663–12 образует отдельную группу «а» по всем показателям, что свидетельствует о его интересных свойствах — он статистически значимо отличается от всех других штаммов по всем изучаемым параметрам кислотообразующей активности.

Таблица 7. Результаты теста Тьюки

Table 7. Results of the Tukey test

Штамм	Буквенные обозначения попарного сравнения			
	Δ ВТК	Δ ХТК	Δ ВрН	Δ ХрН
663–12	a	a	a	a
637–4	b	b	b	b
703–2	c	c	c	b
549–1	d	d	d	c
618–5	d	e	d	c
792–7	d	e	c	c
738–2–3	c	d	c	c
463–3–6	e	a	b	c
429–6	f	f	e	c

Особый интерес представляет группа штаммов 549–1, 618–5 и 792–7, которые по показателю Δ ВТК относятся к одной статистической группе «d», что означает отсутствие значимых различий в их кислотообразующей активности во время выработки. Однако по другим параметрам они демонстрируют различную групповую принадлежность, что подчеркивает специфичность их метаболических характеристик.

Таким образом, наиболее сильные различия между штаммами наблюдались по их способности подкислять продукт в период хранения при температуре $(6 \pm 1)^\circ\text{C}$, что может быть обусловлено их генетическими различиями в ферментативной активности и устойчивости к низким температурам. Проведенный кластерный анализ выявил физиологические закономерности кислотообразования у изученных штаммов *L. lactis*. Выделенные три кластера представляют собой различные метаболические профили, определяющие потенциальное применение штаммов в технологических процессах.

В итоге кластерный анализ позволил распределить изученные штаммы лактококков на три группы по характеру ферментативного профиля при различных температурных режимах. По интенсивности ферментативной активности в период ферментации и охлаждения до температуры хранения, а также по показателю ацидофикации в процессе хранения к первому кластеру были отнесены штаммы с наибольшей активностью, ко второму классу — штаммы с умеренной и к третьему классу — с минимальной кислотностью. Но при составлении заквасочных консорциумов для различных ферментированных молочных продуктов выбор штаммов будет определяться не только номером класса, но и целевыми показателями. Например, при формировании консорциумов для производства сметаны, кисломолочных напитков и творога с длительными сроками годности одним из целевых показателей будет уровень кислотообразования при температуре хранения.

Несмотря на наглядность предварительной кластеризации методом равных интервалов, для многомерного анализа всего комплекса параметров, более убедительного обобщения и выявления скрытых структур в данных потребовалось применение более совершенных методов — в частности, кластерного анализа по методу Уорда с использованием евклидовой метрики расстояния. Это позволило объективно сгруппировать штаммы по сходству физиологических профилей (Рисунок 5 и Рисунок 6).

Исходя из результатов анализа, представленных на финальной тепловой карте (Рисунок 6), штаммы-лидеры по кислотообразующей активности во время выработки (*L. lactis* 663–12, 792–7, 618–5 и 549–1) демонстрируют наибольшую скорость первичного кислотообразования, что проявляется в значениях прироста титруемой кислотности после сквашивания $73,67^\circ\text{T}$, $70,00^\circ\text{T}$, $69,00^\circ\text{T}$ и $69,00^\circ\text{T}$

соответственно. Эта характеристика критически важна для производства с сокращенным циклом ферментации. Высокие значения снижения активной кислотности у этих штаммов (1,93, 1,80, 1,89 и 1,87 ед. рН соответственно) дополнительно подтверждают их способность к интенсивному подкислению среды во время ферментации при оптимальной температуре.

Напротив, штаммы *L. lactis* 738–2–3, 618–5 и 792–7 с низкой постацидофикацией, прирост титруемой кислотности которых при хранении составил $7,3^\circ\text{T}$, $5,0^\circ\text{T}$ и $4,7^\circ\text{T}$ соответственно, представляют особый интерес при производстве продуктов с пролонгированным сроком годности. Их слабая способность кислотообразования при низких температурах хранения может свидетельствовать о стабильности продукта после окончания основного технологического цикла.

Особенно показателен случай штамма *L. lactis* 429–6, который при относительно слабой кислотообразующей активности, обеспечивающей увеличение титруемой кислотности на $54,7^\circ\text{T}$ во время выработки, проявлял значительную активность во время хранения (прирост за этот период составил $16,7^\circ\text{T}$), что может указывать на адаптацию к стрессовым условиям.

Штамм *L. lactis* 663–12 продемонстрировал универсальность, входя в группу лидеров по обоим параметрам: прирост титруемой кислотности составил $73,7^\circ\text{T}$ во время выработки и $20,0^\circ\text{T}$ при хранении. Такой сбалансированный профиль кислотообразующей активности делает его ценным для универсальных производственных линий, где требуется как быстрое сквашивание, так и интенсивный рост кислотности при низких температурах. Например, в сыроделии высокая ферментативная активность при созревании важна как с точки зрения обеспечения безопасности продукта из-за быстрой утилизации остаточной лактозы, так и с точки зрения интенсивности процесса созревания.

Группа штаммов 2 класса со средними показателями (*L. lactis* 738–2–3 и 703–2) является перспективной для технологий, где требуется предсказуемое и стабильное кислотообразование без экстремальных значений. Их умеренная активность может быть преимуществом в производстве продуктов с нежным вкусовым профилем, где избыточно выраженная кислотность нежелательна. Штамм *L. lactis* 463–3–6, показавший наиболее низкие значения по всем параметрам, тем не менее представляет ценность как потенциальный компонент поливидовых многоштаммовых бактериальных заквасок.

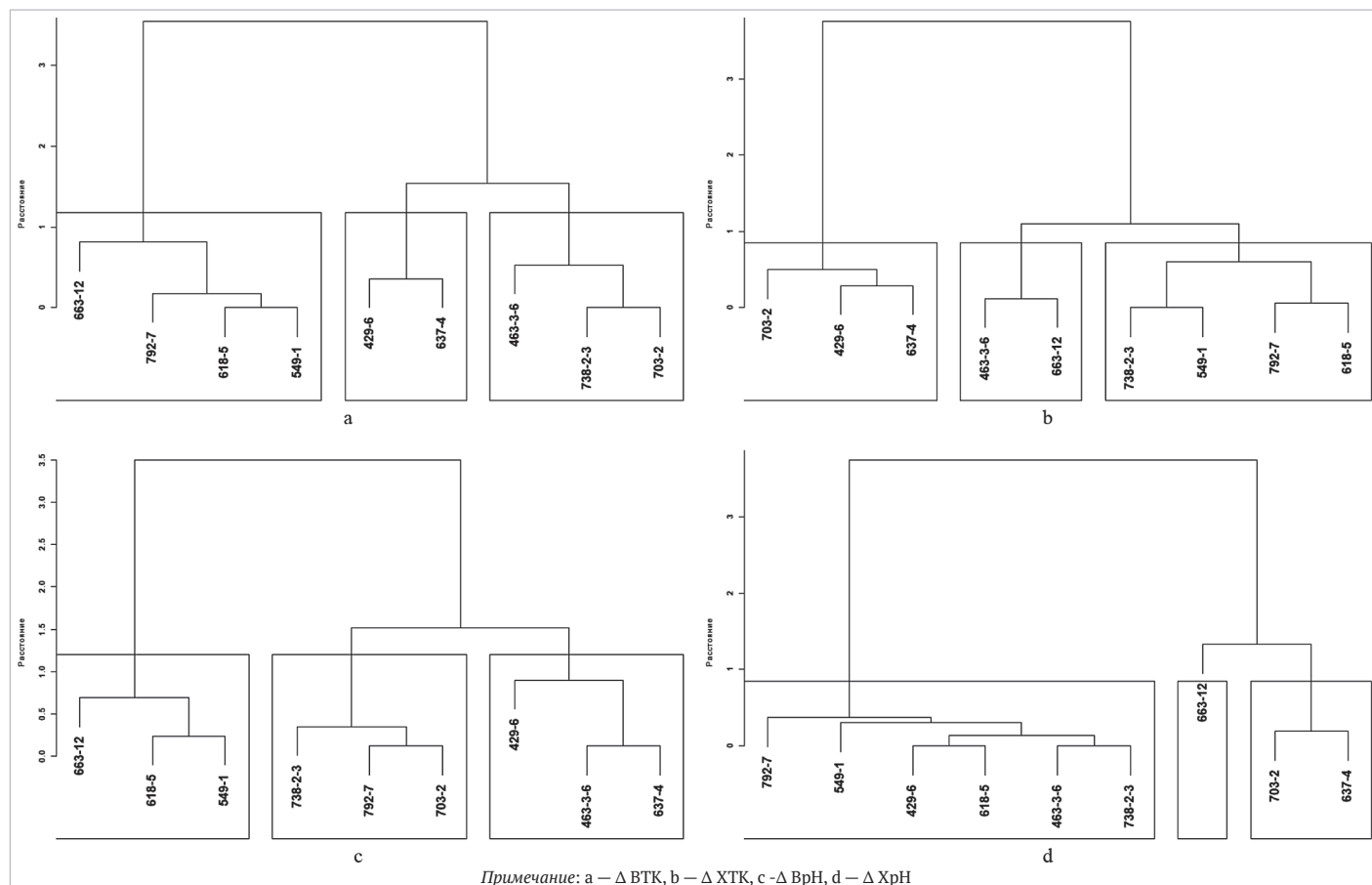


Рисунок 5. Дендрограммы результатов иерархической кластеризации
Figure 5. Dendrograms of the results of the hierarchical clustering

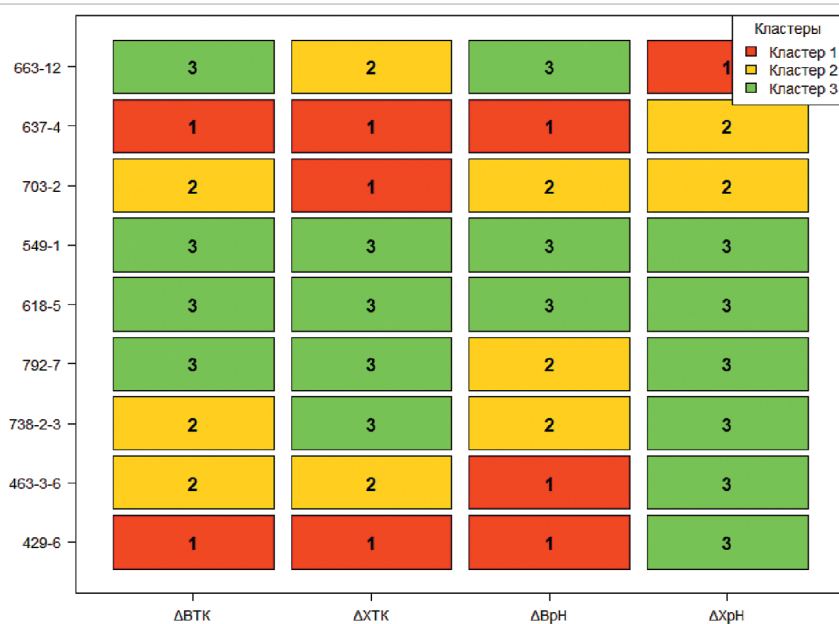


Рисунок 6. Тепловая карта кластеров штаммов *L. lactis* по показателям кислотообразования
Figure 6. Cluster heat map of *L. lactis* strains by indicators of acid formation

сок, где его умеренная активность может служить баланси́ром для более метаболически активных штаммов.

Вариабельность в кислотообразующей активности молочнокислых бактерий во время хранения может быть связана с экспрессией генов холодового шока, с различной устойчивостью к низкому уровню активной кислотности и со способностью утилизировать остаточные субстраты в готовом продукте.

Изучение особенностей ферментации молочнокислых бактерий, в т. ч. *L. lactis*, продолжает вызывать интерес исследований как в России, так и за рубежом. При этом объектами исследований являются и коллекционные культуры, и новые эффективные штаммы, поиск которых продолжается среди различных природных и производственных источников, несмотря на то, что было выделено и охарактеризовано множество штаммов [15,32–34]. К примеру, В. А. Семенова с соавторами [35] при оценке коллекционных культур лактококков применили классический принцип отбора штаммов, пригодных для включения в состав заквасок для кисломолочных продуктов, и отнесли к наиболее важным свойствам *L. lactis* высокую скорость сквашивания, способность образовывать сгустки с колющейся консистенцией и хорошо отделяющейся сывороткой. Было выбрано 4 штамма *L. lactis*, которые сквашивали молоко за 6,0–7,5 часов и обеспечивали титруемую кислотность от 87 °Т до 115 °Т. В работе Е. М. Трубицыной [36] с соавторами при выделении и оценке биотехнологического потенциала культур лактококков, перспективных для использования в составе бактериальных заквасок, также исследовалась только интенсивность кислотообразования при оптимальной температуре. Отобранные ими 20 штаммов лактококков имели предельную титруемую кислотность от 100,87 до 113,10 °Т [36].

В статье Li с соавторами [37] представлены результаты поиска штаммов лактококков, пригодных для использования в качестве заквасок из традиционных китайских кисломолочных продуктов, а также исследования характера ферментации 227 выделенных «диких» изолятов. При этом авторы обнаружили 55 изолятов, сквашивающих молоко за 12 часов при внесении инокулята из расчета количества клеток 10^6 – 10^7 КОЕ/см³, а у остальных изолятов продолжительность сквашивания молока варьировала в широком диапазоне вплоть до 40 часов. Выявлено 16 изолятов (29% от 12-часовых изолятов), которые обладали хорошей скоростью ферментации и низкой постацидофикацией при хранении. На этом основании авторы высказали мнение о высоком уровне генетического разнообразия среди «диких» штаммов вида *L. lactis*, требующего дальнейшего изучения.

В нашем исследовании доля культур активных кислотообразователей с низким уровнем ацидофикации при хранении (три штамма с высокой скоростью ферментации, что составляет 33% от девяти исследованных) была аналогичной описанной в работе Li с соавторами [37]. При этом все исследованные нами штаммы сквашивали молоко за 6 ч при дозе внесения $2,8 \times 10^7$ КОЕ/см³. Это может быть обусловлено тем, что при формировании биобанкинга производствен-

но-ценных культур во ВНИИ маслodelия и сыроделия использовался принцип отбора из различных природных и производственных источников культур *L. lactis* и *L. cremoris* с высоким кислотообразующим потенциалом. Однако полученные результаты исследований позволяют предполагать, что скрининг большого числа лактококков, численность которых в коллекции микроорганизмов ВНИИ маслodelия и сыроделия составляет более 3500 штаммов, может выявить достаточное количество штаммов с различным ферментативным профилем, включая штаммы с высоким уровнем метаболизма лактозы в процессе основной ферментации одновременно с низкой ацидофикацией при низких температурах хранения молочной продукции.

4. Выводы

Проведенные исследования показали, что ферментативные особенности штаммов *L. lactis* при развитии в молоке при различных температурных условиях обусловлены штамм-специфическими характеристиками, но не таксономической принадлежностью. Это следует из выраженной вариабельности кислотообразующей активности среди близкородственных штаммов как в процессе ферментации при оптимальной температуре, так и при охлаждении и хранении при низкой температуре.

Результаты этой работы дополняют существующие фенотипические данные о характеристике ферментации культур *L. lactis* subsp. *lactis*. Кроме того, выявлены штаммы с хорошей интенсивностью ферментации и низким уровнем ацидофикации, потенциально пригодные в качестве заквасочных культур для изготовления кисломолочных продуктов с длительными сроками хранения.

Практическая значимость результатов заключается в возможности целенаправленного дифференцированного подбора штаммов для специализированных технологических задач. Выявленные закономерности позволяют прогнозировать ход технологического процесса при использовании поливидовых заквасок и оптимизировать их состав для достижения идентификационных органолептических характеристик ферментированных молочных продуктов.

Полученные данные также подчеркивают необходимость пересмотра традиционных подходов к оценке заквасочных культур, где акцент часто делается исключительно на скорости кислотообразования, без учета постферментативного потенциала. Использованный в данном исследовании подход к моделированию температурных режимов, характерных для технологии различных ферментированных молочных продуктов, требует дальнейшего совершенствования и исследований на большом количестве штаммов. Кластерный анализ и интегральная оценка кислотообразующей активности коллекционных культур на всех технологических этапах позволит шире раскрыть потенциал штаммов и оптимизировать их применение в современной молочной промышленности при изготовлении различных ферментированных молочных продуктов. Эти показатели планируется внести в пополняемую базу данных.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / REFERENCES

- Hutkins, R. W. (2018). *Microbiology and Technology of Fermented Foods*. Wiley-Blackwell, 2018. <https://doi.org/10.1002/9780470277515>
- Altieri, C., Ciuffreda, E., Di Maggio, B., Sinigaglia, M. (2017). Lactic acid bacteria as starter cultures. Chapter in a book: *Starter Cultures in Food Production*. Weinheim, Germany: John Wiley & Sons., 2017.
- Fusieger, A., Martins, M. C. F., de Freitas, R., Nero, L. A., de Carvalho, A. F. (2020). Technological properties of *Lactococcus lactis* subsp. *lactis* bv. *diacetylactis* obtained from dairy and non-dairy niches. *Brazilian Journal of Microbiology*, 51(1), 313–321. <https://doi.org/10.1007/s42770-019-00182-3>
- Камартидинова, Д. Р., Китаевская, С. В., Решетник, О. А., Тюрин, М. Ю. (2025). Разработка консорциума молочнокислых бактерий с антиоксидантными свойствами. *Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств»*, 2, 15–24. [Kamartdinova, D. R., Kitaevskaya, S. V., Reshetnik, O. A., Turin, M. Yu. (2025). Development of a lactic acid bacteria consortium with antioxidant properties. *Processes and Food Production Equipment*, 2, 15–23. (In Russian)]. <https://doi.org/10.17586/2310-1164-2025-18-2-14-23>
- Wang, Y., Wu, J., Lv, M., Shao, Z., Hungwe, M., Wang, J. et al. (2021). Metabolism characteristics of lactic acid bacteria and the expanding applications in food industry. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 9, Article 612285. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2021.612285>
- Tamime, A. Y., Robinson, R. K. (2007). *Tamime and Robinson's Yoghurt: Science and Technology*. Woodhead Publishing, 2007. <https://doi.org/10.1533/9781845692612>
- De Melo Pereira, G. V., De Carvalho Neto, D. P., De O. Junqueira, A. C., Karp, S. G., Letti, L. A. J., Magalhães Júnior, A. I. et al. (2019). A review of selection criteria for starter culture development in the food fermentation industry. *Food Reviews International*, 36(2), 135–167. <https://doi.org/10.1080/87559129.2019.1630636>
- Шухалова, О. М. (2021). Основные критерии подбора заквасочных микроорганизмов в состав бактериальных заквасок для созревающих сыров. *Пищевые системы*, 4(3S), 315–320. [Shukhalova, O. M. (2021). Main criteria for selection of microorganisms in the composition of bacterial starter for ripening cheeses. *Food Systems*, 4(3S), 315–320. (In Russian)] <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2021-4-3S-315-320>
- Kelleher, P., Mahony, J., Bottacini, F., Lugli, G. A., Ventura, M., van Sinderen, D. (2019). The *Lactococcus lactis* Pan-Plasmidome. *Frontiers in Microbiology*, 10, Article 707. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.00707>
- White, K., Eraclio, G., McDonnell, B., Bottacini, F., Lugli, G. A., Ventura, M. et al. (2024). A multifaceted investigation of lactococcal strain diversity in undefined mesophilic starter cultures. *Applied and Environmental Microbiology*, 90(3), Article e0215223. <https://doi.org/10.1128/aem.02152-23>
- Panebianco, F., Giarratana, F., Caridi, A., Sidari, R., De Bruno, A., Giuffrida, A. (2021) Lactic acid bacteria isolated from traditional Italian dairy products: Activity against *Listeria monocytogenes* and modelling of microbial competition in soft cheese. *LWT*, 137(17), Article 110446. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110446>
- De Vos, P., Garrity, G. M., Jones, D., Krieg, N. R., Ludwig, W., Rainey, F. A. et al. (2009). *Bergey's manual® of systematic bacteriology*. Firmicutes. Springer New York, NY, 2009.
- Iskandar, C. F., Cailliez-Grimal, C., Borges, F., Revol-Junelles, A.-M. (2019) Review of lactose and galactose metabolism in lactic acid bacteria dedicated to expert genomic annotation. *Trends in Food Science and Technology*, 88, 121–132. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.03.020>
- Pohanka, M. (2020). D-Lactic acid as a metabolite: Toxicology, diagnosis, and detection. *BioMed Research International*, 2020, Article 3419034. <https://doi.org/10.1155/2020/3419034>
- Ma'slak, E., Zloch, M., Arendowski, A., Sugajski, M., Janczura, I., Rudnicka, J. et al. (2022). Isolation and identification of *Lactococcus lactis* and *Weissella cibaria* strains from fermented beetroot and an investigation of their properties as potential starter cultures and probiotics. *Foods*, 11(15), Article 2257. <https://doi.org/10.3390/foods11152257>
- Bintsis, T. (2018). Lactic acid bacteria as starter cultures: An update in their metabolism and genetics. *AIMS Microbiology*, 4(4), 665–684. <https://doi.org/10.3934/microbiol.2018.4.665>
- Li, T. T., Tian, W. L., Gu, C. T. (2019). Elevation of *Lactococcus lactis* subsp. *cremoris* to the Species Level as *Lactococcus cremoris* sp. nov. and Transfer of *Lactococcus lactis* subsp. *tractae* to *Lactococcus cremoris* as *Lactococcus cremoris* subsp. *tractae* comb. nov. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 71(3), Article 004727. <https://doi.org/10.1099/ijsem.0.004727>
- Manno, M. T., Zuljan, F., Alarcón, S., Esteban, L., Blancato, V., Espariz, M. et al. (2018). Genetic and phenotypic features defining industrial relevant *Lactococcus lactis*, *L. cremoris* and *L. lactis* biovar. *diacetylactis* strains. *Journal Biotechnology*, 282, 25–31. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2018.06.345>
- Kim, W. S., Ren, J., Dunn, N. W. (1999). Differentiation of *Lactococcus lactis* subspecies *lactis* and subspecies *cremoris* strains by their adaptive response to stresses. *FEMS Microbiology Letters*, 171(1), 57–65. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6968.1999.tb13412.x>
- Zeidan, A. A., Poulsen, V. K., Janzen, T. Buldo, P., Derkx, P. M. F., Øregaard, G. et al. (2017). Polysaccharide production by lactic acid bacteria: From genes to industrial applications. *FEMS Microbiology Reviews*, 41, 168–200. <https://doi.org/10.1093/femsre/fux017>
- Kelleher, P., Mahony, J., Bottacini, F., Lugli, G. A., Ventura, M., van Sinderen, D. (2019). The *Lactococcus lactis* Pan-Plasmidome. *Frontiers in Microbiology*, 10, Article 707. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.00707>
- Свириденко, Г. М., Шухалова, О. М. (2019). Молочнокислые лактококки как основной кислотообразующий компонент. *Молочная промышленность*, 4, 30–33. [Sviridenko, G. M., Shukhalova, O. M. (2019). Lactic acid lactococci as a main acid forming component. *Dairy Industry*, 4, 30–33. (In Russian)] <https://doi.org/10.31515/1019-8946-2019-4-30-33>
- Zapaśnik, A., Sokołowska, B., Bryła, M. (2022). Role of lactic acid bacteria in food preservation and safety. *Foods*, 11(9), Article 1283. <https://doi.org/10.3390/foods11091283>
- Guan, Y., Cui, Y., Qu, X., Li, B., Zhang, L. (2024). Post-acidification of fermented milk and its molecular regulatory mechanism. *International Journal of Food Microbiology*, 426, Article 110920. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2024.110920>
- Гудков, А. В. (2004). Сыроделие: технологические, биологические и физико-химические аспекты. М.: ДеЛи принт, 2004. [Gudkov, A. V. (2004). Cheese making: Technological, biological and physico-chemical aspects. Moscow: Dely print, 2004. (In Russian)]
- McSweeney, P. L. N., Cotter, P. D., Everett, D. W. (2017). *Cheese: Chemistry, Physics and Microbiology*. Academic Press, 2017.
- Kok, J., van Gijtenbeek, L. A., de Jong, A. van der Meulen, S. B., Solopova, A., Kuipers, O. P. (2017). The evolution of gene regulation research in *Lactococcus lactis*. *FEMS Microbiology Reviews*, 41(Supp_1), S220–S243. <https://doi.org/10.1093/femsre/fux028>
- Свириденко, Г. М., Шухалова, О. М. (2020). Влияние температуры на развитие и метаболизм основной кислотообразующей заквасочной микрофлоры. *Молочная промышленность*, 7, 49–51. [Sviridenko, G. M., Shukhalova, O. M. (2020). The effect of temperature on the development and metabolism of the main acid-forming starter microflora. *Dairy Industry*, 7, 49–51. (In Russian)] <https://doi.org/10.31515/1019-8946-2020-07-49-51>
- Poudel, R., Thunell, R. K., Oberg, C. J., Lefevre, M., Oberg, T. S., McMahon, G. J. (2022). Comparison of growth and survival of single strains of *Lactococcus lactis* and *Lactococcus cremoris* during Cheddar cheese manufacture. *Journal of Dairy Science*, 105(3), 2069–2081. <https://doi.org/10.3168/jds.2021-20958>
- Deshwal, G. K., Tiwari, S., Kumar, A., Raman, R. K., Kadyan, S. (2021). Review on factors affecting and control of post-acidification in yoghurt and related products. *Trends in Food Science and Technology*, 109, 499–512. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.01.057>
- Просяков, А. Ю., Остроумов, Л. А. (2016). Инновационный менеджмент технологий заквасочных культур. *Техника и технология пищевых производств*, 4(43), 64–69 [Prosekov, A. Yu., Ostroumov, L. A. (2016). Innovation management biotechnology of starter cultures. *Food Processing: Techniques and Technology*, 43(4), 64–69 (In Russian)]
- Mahony, J., Bottacini, F., van Sinderen, D. (2023). Towards the diversification of lactococcal starter and non-starter species in mesophilic dairy culture systems. *Microbial Biotechnology*, 16(9), 1745–1754. <https://doi.org/10.1111/1751-7915.14320>
- Дорофеев, Р. В., Кузнецова, Т. Н., Отт, Е. Ф., Функ, И. А. (2023). Выделение лактококков, перспективных для молочной промышленности. *Ползуновский вестник*, 4, 24–28 [Dorofeev, R. V., Kuznetsova, T. N., Ott, E. F., Funk, I. A. (2023). Isolation of lactococci promising for dairy industry. *Polzunovskiy Vestnik*, 4, 24–28. (In Russian)]. <https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2023.04.003>
- Cavanagh, D., Casey, A., Altermann, E., Cotter, P. D., Fitzgerald, G. F., McAuliffe, O. (2015). Evaluation of *Lactococcus lactis* isolates from non-dairy sources with potential dairy applications reveals extensive phenotype-genotype disparity and implications for a revised species. *Applied Environmental Microbiology*, 81(12), 3961–3972. <https://doi.org/10.1128/AEM.04092-14>
- Семенова, В. А., Митрова, В. А., Кишилова, С. А., Рожкова, И. В., Петров, А. Н. (2025). Сравнительная оценка свойств производственно ценных штаммов *Lactococcus*. *Пищевая промышленность*, 8, 82–87. [Semenova, V. A., Mitrova V. A., Kishilova, S. A., Rozhkova, I. V., Petrov, A. N. (2025). Comparative assessment of properties of industrially important *Lactococcus* strains. *Food Industry*, 8, 82–87. (In Russian)]. <https://doi.org/10.52653/PP1.2025.8.8.022>
- Трубицына, Ю. М., Отт, Е. Ф., Дорофеев, Р. В., Шевченко, К. Е., Грянкина, Т. В. (2024). Биотехнологические свойства лактококков, выделенных из природных источников. *Ползуновский вестник*, 3, 29–35. [Trubitsyna, Ju. M., Ott, E. F., Dorofeev, R. V., Shevchenko, K. E., Gryankina, T. V. (2024). Biotechnological properties of lactococci isolated from natural sources. *Polzunovskiy Vestnik*, 3, 29–35. (In Russian)] <https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2024.03.004>
- Li, W., Ren, M., Duo, L., Li, J., Wang, S., Sun, Y. et al. (2020). Fermentation Characteristics of *Lactococcus lactis* subsp. *lactis* isolated from naturally fermented dairy products and screening of potential starter isolates. *Frontiers in Microbiology*, 11, Article 1794. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.01794>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ	AUTHOR INFORMATION
Принадлежность к организации	Affiliation
Дуганова Анна Юрьевна — младший научный сотрудник, отдел микробиологии, Федеральный научный центр пищевых систем им. В. М. Горбатова РАН 152613, Ярославская область, Углич, Красноармейский бульвар, 19 E-mail: a.duganova@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9033-5928 * автор для контактов	Anna Yu. Duganova , Junior Researcher, Department of Microbiology, V. M. GorbatoV Federal Scientific Center for Food Systems of the Russian Academy of Sciences 19, Krasnoarmeysky Boulevard, Uglich, 152613, Yaroslavl Region, Russia E-mail: a.duganova@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9033-5928 * corresponding author
Сорокина Нинель Петровна — кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, отдел микробиологии, Федеральный научный центр пищевых систем им. В. М. Горбатова РАН 152613, Ярославская область, Углич, ул. Красноармейский бульвар, 19 E-mail: n.sorokina@fncps.ru ORCID: http://orcid.org/0000-0002-1108-3695	Ninel P. Sorokina , Candidate of Technical Sciences, Leading Researcher, Department of Microbiology, V. M. GorbatoV Federal Scientific Center for Food Systems of the Russian Academy of Sciences 19, Krasnoarmeysky Boulevard, Uglich, 152613, Yaroslavl Region, Russia E-mail: n.sorokina@fncps.ru ORCID: http://orcid.org/0000-0002-1108-3695
Мамыкин Денис Станиславович — младший научный сотрудник, отдел микробиологии, Федеральный научный центр пищевых систем им. В. М. Горбатова РАН 152613, Ярославская область, Углич, Красноармейский бульвар, 19 E-mail: d.mamykin@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2145-1439	Denis S. Mamykin , Junior Researcher, Department of Microbiology, V. M. GorbatoV Federal Scientific Center for Food Systems of the Russian Academy of Sciences 19, Krasnoarmeysky Boulevard, Uglich, 152613, Yaroslavl Region, Russia E-mail: d.mamykin@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2145-1439
Семенова Анастасия Артуровна — доктор технических наук, заместитель директора по научной работе, Федеральный научный центр пищевых систем им. В. М. Горбатова РАН 109316, Москва, ул. Талалихина, 26 E-mail: a.semenova@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4372-6448	Anastasia A. Semenova , Doctor of Technical Sciences, Deputy Director for Scientific Work V. M. GorbatoV Federal Scientific Center for Food Systems of the Russian Academy of Sciences 26, Talalikhin str., Moscow, 109316, Russia E-mail: a.semenova@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4372-6448
Рогов Григорий Новомирович — кандидат технических наук, директор филиала, Федеральный научный центр пищевых систем им. В. М. Горбатова РАН 152613, Ярославская область, Углич, Красноармейский бульвар, 19 E-mail: g.rogov@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0009-0001-4540-5314	Grigory N. Rogov , Candidate of Technical Sciences, Director of the Branch, V. M. GorbatoV Federal Scientific Center for Food Systems of the Russian Academy of Sciences 19, Krasnoarmeysky Boulevard, Uglich, 152613, Yaroslavl Region, Russia E-mail: g.rogov@fncps.ru ORCID: http://orcid.org/0009-0001-4540-5314
Беленко Андрей Александрович — кандидат биологических наук, заведующий лабораторией генетических исследований, Федеральный научный центр пищевых систем им. В. М. Горбатова РАН 191014, Россия, г. Санкт-Петербург, Литейный пр., 55 E-mail: a.belenko@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0009-0007-1914-2972	Andrey A. Belenko , Candidate of Biological Sciences, Head of the Laboratory of Genetic Research, V. M. GorbatoV Federal Scientific Center for Food Systems of the Russian Academy of Sciences 55, Liteiny prospect, 191014, Saint Petersburg, Russia, E-mail: a.belenko@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0009-0007-1914-2972
Критерии авторства	Contribution
Концептуализация — Сорокина Н. П. и Семенова А. А. ; Методология — Сорокина Н. П. и Рогов Г. Н. ; Исследование — Дуганова А. Ю. ; Обработка и анализ данных — Мамыкин Д. С. и Дуганова А. Ю. ; Написание статьи и редактирование — Сорокина Н. П., Семенова А. А., Дуганова А. Ю., Беленко А. А. Авторы в равных долях имеют отношение к написанию рукописи и одинаково несут ответственность за плагиат.	Conceptualization — Ninel P. Sorokina, Anastasia A. Semenova; methodology — Ninel P. Sorokina, Grigory N. Rogov; investigation — Anna Yu. Duganova data curation and analysis — Denis S. Mamykin, Anna Yu. Duganova writing-article and editing — Ninel P. Sorokina, Anastasiya A. Semenova, Anna Yu. Duganova, Belenko A. A. 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/10.21323/2618-9771-2025-8-4-576-582>



Received 15.07.2025

Accepted in revised 29.11.2025

Accepted for publication 04.12.2025

© Baioumy A. A., Abdeldayem F. A., Abdelfattah T. T., Aziz M. M.,
Hamed R. R., Yousef Y. H., Abedelmaksoud T. G., 2025

Available online at <https://www.fsjour.com/jour>

Original scientific article

Open access

DEVELOPMENT AND EVALUATION OF LOW-CALORIE STRAWBERRY JAM ENRICHED WITH PSYLLIUM HUSK: A FUNCTIONAL INGREDIENT APPROACH

Ahmed A. Baioumy, Fayrouz A. Abdeldayem, Tasneem T. Abdelfattah, Maria M. Aziz,
Rawan R. Hamed, Yasmine H. Yousef, Tarek G. Abedelmaksoud*

Food Science Department, Faculty of Agriculture, Cairo University, Egypt

KEYWORDS:

*healthy jam,
low sugar, dietary
fibers, health
promotion,
food formulation*

ABSTRACT

This study aimed to develop a nutritionally enhanced strawberry jam by partially replacing sugar with psyllium husk, a functional dietary fiber known for its water-binding and gel-forming capabilities. Three reduced-sugar formulations (Trials 1–3) containing 25 % psyllium husk solution and varying sugar concentrations (12 %, 26 %, and 30 %) were compared to a traditional control jam (66 % Brix). The impact of psyllium inclusion on the physical, chemical, microbiological, and sensory properties of the jams was evaluated. Sensory analysis was performed by a trained panel of 20 consumers using a 9-point hedonic scale to assess appearance, flavor, odor, spreadability, and overall acceptability. Results showed that psyllium-enriched formulations had significantly lower Brix, total carbohydrates, ash content, and estimated caloric values, while fiber content increased up to 1.05 g/100 g. The pH of all samples remained below 3.0, ensuring microbial safety, with total plate counts <1.0 log CFU/g across all treatments. Instrumental color analysis indicated improved lightness and redness in fiber-enriched samples. Among the tested samples, Trial 3 (30 % sugar, 25 % psyllium husk solution) achieved the highest sensory scores and reached a final Brix value of 63 %, making it the most acceptable formulation. These findings demonstrate that psyllium husk can successfully replace part of sugar while enhancing nutritional value, texture, and palatability. The optimized formulation shows promising potential for commercial application in producing healthier, low-calorie fruit preserves.

Поступила 15.07.2025

Поступила после рецензирования 29.11.2025

Принята в печать 04.12.2025

© Баюми А. А., Абдельдайем Ф. А., Абдельфаттах Т. Т., Азиз М. М.,
Хамед Р. Р., Юсеф Ю. Х., Абедельмаксуд Т. Г., 2025

<https://www.fsjour.com/jour>

Научная статья

Открытый доступ

РАЗРАБОТКА И ОЦЕНКА НИЗКОКАЛОРИЙНОГО КЛУБНИЧНОГО ДЖЕМА, ОБОГАЩЕННОГО ШЕЛУХОЙ СЕМЯН ПОДРОЖНИКА: ПОДХОД С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ИНГРЕДИЕНТОВ

Баюми А. А., Абдельдайем Ф. А., Абдельфаттах Т. Т., Азиз М. М.,
Хамед Р. Р., Юсеф Ю. Х., Абедельмаксуд Т. Г.*

Кафедра пищевых наук, Сельскохозяйственный факультет, Каирский университет, Гиза, Египет

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: АННОТАЦИЯ

*полезный для
здоровья джем,
низкое содержание
сахара,
стимулирование
здоровья, рецептура
пищевых продуктов*

Целью данного исследования была разработка обогащенного нутриентами клубничного джема с частичной заменой сахара на шелуху семян подорожника — функциональных пищевых волокон, известных своими водосвязывающими и гелеобразующими свойствами. Проведено сравнение трех рецептур с пониженным содержанием сахара (опыты 1–3), содержащих 25 % раствора шелухи семян подорожника и различные концентрации сахара (12 %, 26 %, и 30 %) и традиционного контрольного джема (66 % Брикс). Оценивали влияние включения подорожника на физические, химические, микробиологические и органолептические свойства джемов. Органолептический анализ был проведен обученной дегустационной комиссией из 20 потребителей, используя девятибалльную гедонистическую шкалу для оценки внешнего вида, флейвора, запаха, способности к намазыванию и общей приемлемости. Результаты показали, что обогащенные подорожником рецептуры имеют значимо более низкие уровни Брикс, общих углеводов, содержания золы и оцененные уровни калорий, в то время как содержание клетчатки увеличилось до 1,05 г/100 г. Уровни pH всех образцов оставались ниже 3,0, обеспечивая микробиологическую безопасность с общим количеством микроорганизмов, определенным чашечным методом, <1,0 log КОЕ/г во всех обработках. Инструментальный анализ цвета показал улучшенную светлоту и красноту в обогащенных волокнами образцах. Среди тестированных образцов, опыт 3 (30 % сахара, 25 % раствора шелухи семян подорожника) получил наивысшие баллы органолептической оценки и достиг конечного уровня Брикс 63 %, что делает его наиболее приемлемой рецептурой. Эти результаты демонстрируют, что шелуха семян подорожника может успешно заменить часть сахара при повышении питательной ценности, текстуры и вкусовых качеств. Оптимизированная рецептура обладает потенциалом для коммерческого применения при производстве более полезных, низкокалорийных фруктовых консервов.

FOR CITATION: Baioumy, A. A., Abdeldayem, F. A., Abdelfattah, T. T., Aziz, M. M., Hamed, R. R., Yousef, Y. H., Abedelmaksoud, T. G. (2025). Development and evaluation of low-calorie strawberry jam enriched with psyllium husk: A functional ingredient approach. *Food Systems*, 8(4), 576–582. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-4-576-582>

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Баюми, А. А., Абдельдайем, Ф. А., Абдельфаттах, Т. Т., Азиз, М. М., Хамед, Р. Р., Юсеф, Ю. Х., Абедельмаксуд, Т. Г. (2025). Разработка и оценка низкокалорийного клубничного джема, обогащенного шелухой семян подорожника: подход с использованием функциональных ингредиентов. *Пищевые системы*, 8(4), 576–582. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-4-576-582>

1. Introduction

Strawberries (*Fragaria x ananassa*), members of the Rosaceae family, are among the most widely consumed berries worldwide and are extensively used in the production of jams, ice creams, and juices due to their appealing flavor, vivid red color, and nutritional richness. Strawberry cultivation is highly adaptable to diverse climates and is characterized by high yield potential. Egypt ranks among the top 15 global strawberry exporters and is the leading producer in Africa, with production reaching approximately 638,000 tons in 2022, showing robust annual growth in both cultivated area and yield. The continuous development of Egypt's strawberry sector has been driven by technological improvements and increasing global demand, consolidating the country's position as a major player in international strawberry markets [1–4]. Strawberries consist primarily of water (91 %) and carbohydrates (7.7 %), and are rich in vitamins, polyphenols, and dietary fiber [5]. Their bioactive components contribute to various health benefits, including antioxidant activity, anti-inflammatory effects, improved vascular function, and reduced LDL oxidation — factors linked to the prevention of chronic diseases such as cardiovascular disorders and certain cancers. Numerous studies have shown that phenolic compounds, anthocyanins, and vitamin C in strawberries play a significant role in the reduction of oxidative stress, amelioration of lipid profiles, inhibition of inflammatory pathways, and protection against the proliferation of cancer cells [6,7]. However, due to their high perishability, strawberries are often processed into shelf-stable products such as jams to reduce postharvest losses while preserving their nutritional value. Strawberries spoil rapidly after harvest because of their delicate skin, high respiration rate, and susceptibility to microbial contamination, so processing into jams and similar products is a well-established strategy to extend usability and minimize waste without significantly compromising key nutrients [8,9].

Jam is a widely consumed fruit preserve prepared by heating fruit pulp with sugar, pectin, and acid to create a stable gel matrix. Conventional jams typically contain high levels of added sugars, commonly reaching up to 65 % Brix, which serve crucial roles in ensuring microbial stability, gel structure, and overall palatability. Despite their favorable sensory attributes, these elevated sugar contents have raised health concerns due to their association with an increased risk of noncommunicable diseases (NCDs) such as obesity, type 2 diabetes, and cardiovascular disorders. The growing awareness of these health risks is driving demand for fruit preserves with reduced sugar content and enhanced nutritional value [10].

According to the World Health Organization (WHO), global per capita sugar consumption exceeds 50–100 grams per day in many countries, which is about twice the recommended limit of less than 10 % of total daily energy intake. Reducing free sugar intake to below 5 % of total daily energy intake, roughly 25 grams (6 teaspoons) per day for adults offers additional health benefits, such as lowering risks of overweight, obesity, tooth decay, and noncommunicable diseases. These recommendations are supported as a long-term public health goal by both WHO and FAO, and have been jointly reiterated in their latest nutrition guidelines and action plans. High sugar consumption is strongly associated with obesity, type 2 diabetes, metabolic syndrome, dental caries, and cardiovascular disease. These alarming trends have led consumers and industry stakeholders to seek healthier alternatives that reduce sugar without compromising product quality [11–14].

In response, the incorporation of dietary fibers into food formulations has gained increasing attention. Fiber intake is essential for digestive health, glycemic control, and satiety, yet global intake remains below recommended levels, 21–25 g/day for women and 30–40 g/day for men. Among functional fibers, psyllium husk (derived from *Plantago ovata*) stands out due to its unique composition (approximately 35 % soluble and 65 % insoluble fiber) and exceptional water absorption capacity [15,16]. Its gelling, emulsifying, and stabilizing properties make it an ideal clean-label ingredient in low-calorie food products [17].

Psyllium husk is widely recognized for its ability to improve the texture and increase the dietary fiber content in both bakery and extruded products. Its safety has been affirmed by the FDA, and its use in food is well established, particularly for supporting cardiovascular and digestive health. Additionally, psyllium husk maintains excellent stability under heat and varying pH levels, making it a suitable ingredient in jam processing and other thermal applications [18,19].

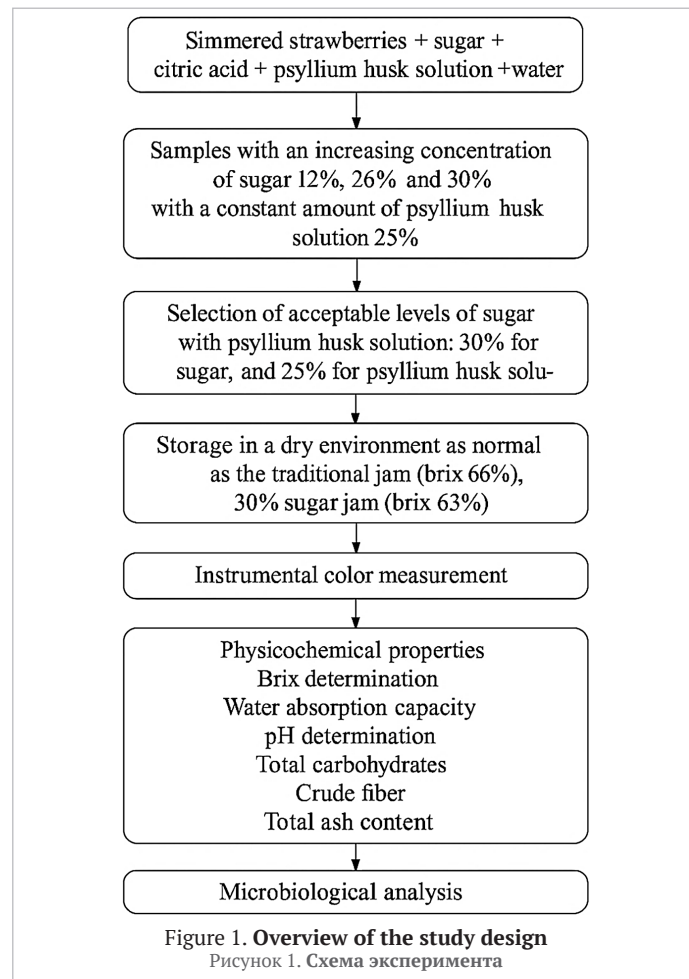
This study aims to develop a healthier, lower-calorie strawberry jam by partially replacing added sugar with a 25 % psyllium husk solution. The optimized formulation specifically targets a significantly reduced sugar content (30 % versus the conventional 60–65 %) while maintaining critical quality attributes — including total soluble solids (Brix), pH, textural integrity, and desirable sensory attributes. By incorporating psyllium

husk as a source of functional soluble fiber, the research seeks to enhance the nutritional value of the jam, promoting potential physiological benefits associated with increased dietary fiber intake. The overarching objective is to produce a functional fruit preserve that combines improved healthfulness and consumer acceptability, thereby fulfilling the expanding market demand for clean-label, fiber-enriched, and nutritionally superior fruit-based products.

2. Objects and methods

2.1. Ingredients used in jam preparation

Strawberries (*Fragaria x ananassa*) were selected as the primary fruit due to their balanced pectin and sugar content, which support proper gel formation. Fresh strawberries, stored at 4 °C prior to processing, enabled a 1:1 fruit-to-sugar ratio, contributing to the desirable consistency and typical physicochemical profile of strawberry jam (60–65 % TSS, pH ~3.3). The final product was stored at 20 °C for shelf stability. Sugar (high-purity, bright white) served multiple functions, including sweetness, gel formation, and microbial stability. The traditional jam formulation (as a control sample) relies on high sugar concentrations (60–65 % Brix). However, to reduce caloric content, this study decreased sugar levels by 45 %. Despite the reduction, sugar's role in achieving proper Brix values and sensory quality was maintained by combining it with psyllium husk as a natural gelling agent. Citric acid was incorporated at 2 g/kg of added sugar, following established formulations [20], and added at the final stage of cooking to prevent sugar crystallization and enhance gel structure. Its inclusion improved flavor, microbial safety, and pH balance, supporting effective gel formation [21]. Psyllium husk (*Plantago ovata*), obtained from local suppliers in Egypt (e. g., Pyramids Herbs, Herbs Oasis, El Badr for Import and Export, Nile Herbal), was used as a clean-label gelling agent. Containing approximately 87.3 % dietary fiber and known for its high-water absorption capacity (absorbing up to 45 times its weight), psyllium husk provides a gel-like texture while supporting satiety and health benefits [22,23]. A 25:1 water-to-husk ratio was used to hydrate the psyllium, which was then incorporated into the jam mixture to compensate for the reduced sugar and maintain traditional jam texture and consumer acceptability. An overview of the study design is shown in Figure 1.



2.2. Jam preparation

Fresh, high-quality strawberries (*Fragaria x ananassa*), locally known as ‘Baladi Strawberries’, were selected, washed thoroughly, decrowned, and cut into small pieces. The fruit was blended with sugar (55% of the total mixture weight) and simmered with continuous stirring to promote pectin release. Citric acid was added to improve texture and prevent crystallization. Psyllium husk quality was assessed via sensory evaluation and water absorption testing to confirm its gelling capacity. A psyllium gel was prepared using 25 mL of warm water per gram of husk, and 45% of this solution (relative to the sugar content typically used) was incorporated into the jam formulation. The mixture was boiled until the total soluble solids (TSS) reached 63% Brix at 20 °C. The psyllium solution was then combined with the cooked strawberry blend, and the jam was rapidly concentrated. Foam was removed, and citric acid was added as a preservative. The final product was hot-filled into sterilized jars at 104 °C, inverted to sanitize the lids and create a vacuum seal, then cooled to 4 °C. Samples were stored in a dry environment and subjected to physicochemical, microbiological, and sensory evaluations. The following table shows the formulations of the control and trials (Table 1).

Table 1. Control and trials of strawberry jam enriched with psyllium husk)

Таблица 1. Контрольные образцы и опытные образцы клубничного джема, обогащенного шелухой семян подорожника

Samples	Components (%)			
	Strawberry	Sugar	Water added	Psyllium husk solution
Control	45	55	0	0
Trial 1	45	12	18	25
Trial 2	45	26	4	25
Trial 3	45	30	0	25

2.3. Physical and chemical analysis

2.3.1. Brix determination

The Brix percentage (%), representing the concentration of total soluble solids (TSS) in an aqueous solution, serves as a key indicator of jam sweetness and overall quality. In this study, various sugar concentrations (12%, 26%, and 30%) were evaluated to identify the optimal Brix value for low-sugar jam formulations, while maintaining the psyllium husk solution at a constant 25% concentration. Brix values were measured using a handheld ATC refractometer (ATAGO CO., LTD., Japan) at 20 °C. A small aliquot of each jam sample was deposited onto the prism surface of the refractometer, the cover was gently closed to distribute the sample evenly, and the device was held perpendicular to a light source. The Brix reading was obtained by observing the demarcation line on the internal scale. This procedure enabled precise quantification of TSS, thereby facilitating the selection of the optimal sugar content for health-oriented jam formulations.

2.3.2. Water absorption capacity

The water absorption capacity (WAC) of psyllium husk is a fundamental property that contributes to its bulking effect and gelling ability. Psyllium husk is known to absorb approximately 45 mL of water per gram. The WAC was assessed following the method reported by Chen et al. [16], wherein 1 g of psyllium husk was combined with 10 mL of distilled water under continuous stirring until saturation. The additional volume of water required to fully hydrate the husk was recorded, providing an empirical measure of its absorption capacity. Figure 2 illustrates the psyllium husk solution.

2.3.3. Color measurement

Color is a critical sensory attribute that directly influences consumer acceptance. The color stability of jams can be affected by factors such as pH, exposure to light and oxygen, thermal processing, enzymatic browning, and sugar degradation [24]. The color of the psyllium husk-enriched jam was analyzed using a colorimeter CHROMA METER CR-410 (Konica

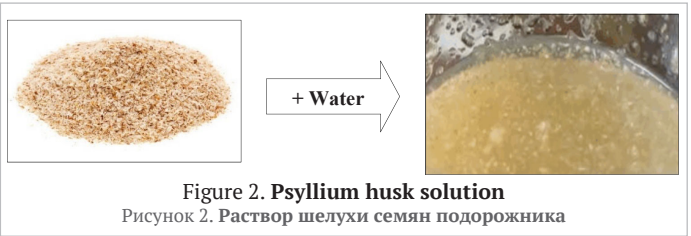


Figure 2. Psyllium husk solution
Рисунок 2. Раствор шелухи семян подорожника

Minolta). Prior to measurement, the instrument was calibrated using standard white and black tiles. Color was assessed using the CIE Lab* system: L* denotes lightness (0 = black, 100 = white), a* indicates red-green chromaticity (positive = red, negative = green), and b* represents yellow-blue chromaticity (positive = yellow, negative = blue). This analytical protocol ensured reproducible and objective color evaluations.

2.3.4. pH determination

Pectin gelation in fruit-based jams is pH-dependent, with an optimal range of 2.8–3.5, as defined by the CODEX Standard for Jams (Fruit Preserves) and Jellies [25]. The pH of the strawberry jam formulations was determined using a calibrated Jenway Model 3305 pH meter (Jenway, UK). For each measurement, 1 g of the jam sample was diluted in 10 mL of distilled water and gently homogenized. The probe was immersed in the solution at ambient temperature (25–26 °C), and pH values were recorded after stabilization.

2.3.5. Total carbohydrates

Total carbohydrate content, reflecting the concentration of mono- and disaccharides such as glucose, fructose, and sucrose, was quantified using the phenol-sulfuric acid colorimetric method developed by Dubois et al. [26]. A 100 µL aliquot of each extract was mixed with 1 mL of 5% phenol solution and 5 mL of concentrated sulfuric acid. The reaction mixture was allowed to cool to room temperature, and absorbance was measured at 490 nm using a UV-Vis spectrophotometer Jenway 6715 (Jenway, UK). D-glucose was used as a standard for calibration, and results were calculated using the regression equation $Y = 92.804x + 0.6703$ ($R^2 = 0.995$), expressed as grams per 100 grams of sample.

2.3.6. Crude fiber

Crude fiber, a non-digestible component beneficial for gut health and microbial fermentation, was measured using the Weende method AOAC [27]. The procedure involved sequential acid (1.25% H₂SO₄) and alkaline (1.25% NaOH) hydrolysis to eliminate digestible carbohydrates. The remaining residue was incinerated at high temperature in a muffle furnace Vulcan A-550 (Degussa-ney dental Inc., USA), followed by drying in a convection oven Binder FD53 (Binder, Germany). The resulting ash-free residue represented the crude fiber content.

2.3.7. Ash content

Ash content, representing the total mineral residue remaining after complete combustion of organic matter, was determined using the standard AOAC method [27]. Samples were subjected to dry ashing in a muffle furnace Vulcan A-550 (Degussa-ney dental Inc., USA) at 500–600 °C. The organic matter was incinerated in the presence of oxygen, resulting in the release of CO₂ and N₂, along with volatilization of water and organics. The residual ash was weighed using an analytical balance Shimadzu ATY Series (Shimadzu, Japan) and expressed as a percentage of the original sample mass.

2.4. Microbiological analysis

The Total Plate Count (TPC) method was used to quantify microbial load, including bacteria, yeast, and mold, as an indicator of product safety and hygiene. The analysis employed the pour plate technique using Plate Count Agar (PCA). Serial dilutions (5–10-fold) of each sample were prepared in sterile saline. A 1 mL aliquot from each dilution was aseptically transferred to a sterile Petri dish, followed by the addition of 15–20 mL of molten PCA. Plates were incubated in an incubator Memmert IN30 (Mettler GmbH, Germany) in an inverted position at 30 °C for 24–48 hours. Colony-forming units (CFUs) were enumerated post-incubation. The microbiological assessments were conducted under controlled conditions (ambient temperature 22.5 °C; relative humidity 42.1 %) [28].

2.5. Sensory evaluation

A structured sensory analysis was conducted to assess consumer perception and preference between the control (conventional jam) and the developed psyllium-enriched jam. A total of 20 trained panelists evaluated samples based on five attributes: appearance, flavor, aroma, spreadability, and overall acceptability. The evaluation employed a 9-point hedonic scale (1 = “dislike extremely” to 9 = “like extremely”) [29]. Panelists were provided with individual plastic spoons and paper ballots for scoring, and a cup of water was supplied to cleanse their palates between samples. Notably, color perception was strongly influenced by the presence of anthocyanins, plant-based pigments responsible for the characteristic red hue of strawberries and known for their antioxidant and protective functions.

2.6. Statistical analysis

All quantitative data were statistically analyzed using one-way analysis of variance (ANOVA) to determine significant differences among

treatment groups. This method allowed for the comparison of mean values across the control and psyllium-enriched jam samples. Differences were considered statistically significant at $p < 0.05$. The ANOVA analysis provided a robust statistical basis for evaluating consumer acceptance scores, chemical composition, and microbiological data across multiple replicates [30].

3. Results and discussion

3.1. Physical and chemical properties of psyllium-enriched strawberry jam

The data presented in Table 2 highlight the significant impact of reducing sugar and incorporating psyllium husk on the physical characteristics of strawberry jam formulations (Figure 3). These changes reflect an effort to produce a healthier jam alternative with improved nutritional properties and acceptable quality attributes.

Table 2. Physical properties of the control and formulated strawberry psyllium jam

Таблица 2. Физические свойства контрольного клубничного джема и клубничного джема с подорожником

Parameters	Control	Trial 1	Trial 2	Trial 3
pH	2.82±0.01 ^d	2.91±0.02 ^c	2.93±0.03 ^b	2.98±0.01 ^a
L*	26.51±0.12 ^b	26.78±0.16 ^b	26.85±0.14 ^b	27.29±0.18 ^a
a*	11.36±0.10 ^b	11.72±0.08 ^b	12.00±0.10 ^a	12.43±0.07 ^a
b*	1.20±0.02 ^c	1.31±0.03 ^b	1.35±0.04 ^{ab}	1.39±0.03 ^a
ΔE	—	0.58	0.88	1.20

Note: All values are expressed as mean±SD ($n = 3$). ΔE was calculated using the control as a reference. Water absorption measured only for psyllium husk. Control (traditional jam): 45 % strawberry, 55 % sugar.

Trial 1: 45 % strawberry, 12 % sugar, 18 % added water, 25 % psyllium husk solution.

Trial 2: 45 % strawberry, 26 % sugar, 4 % added water, 25 % psyllium husk solution.

Trial 3: 45 % strawberry, 30 % sugar, no added water, 25 % psyllium husk solution.

The pH values ranged from 2.82 (control) to 2.98 (Trial 3), indicating that lower sugar formulations preserved a slightly higher pH, likely due to dilution effects and the buffering capacity of fiber. The pH values remained within the acceptable range for jam preservation (<4.5), ensuring microbial safety and favorable gel formation [31]. Color is critical for consumer acceptance. All jam samples maintained vibrant red tones, with increasing a^* values indicating intensified redness in fiber-rich jams. Trial 3 had the highest L^* (27.29) and a^* (12.43) values, possibly due to reduced caramelization at lower sugar levels and enhanced light scattering from fiber [32]. The calculated ΔE of 1.20 suggests perceptible but not dramatic differences in color compared to the control.

In terms of visual appeal, Trial 3 achieved the highest color rating (8.14±0.11). This result aligns with the instrumental color data (Table 2), which indicated higher L^* and a^* values, denoting a brighter and redder product, as illustrated in Figure 3. The absence of added water likely helped maintain the color intensity, as dilution can often lead to paler, less appealing hues. The natural color retention of strawberries, complemented by the fiber matrix of psyllium, contributed to an overall vibrant product.

The data presented in Table 3 highlight the chemical and microbiological properties of control and formulated strawberry psyllium jam

The Brix value reflects total soluble solids, mainly sugars. The control jam, formulated traditionally with high sugar (approximately 66%), exhibited a Brix of 66%, consistent with CODEX standards for conventional jams [25]. Trial 3, incorporating 30 % sugar and no added water, reached a Brix of 63%, validating its suitability for low-sugar jam development.

Table 3. Chemical and microbiological properties of the control and formulated strawberry psyllium jam

Таблица 3. Химические и микробиологические свойства контрольного клубничного джема и клубничного джема с подорожником

Parameters	Psyllium Husk	Control	Trial 1	Trial 2	Trial 3
Brix, %	—	66.00±0.32 ^a	55.00±0.41 ^d	57.00±0.28 ^c	63.00±0.37 ^b
Water absorption, ml/g	46.00±0.24	—	—	—	—
Total carbohydrates, g/100 g	—	41.93±0.44 ^a	38.75±0.35 ^b	36.12±0.38 ^c	33.65±0.41 ^d
Crude fiber, g/100 g	—	0.65±0.02 ^d	0.84±0.01 ^c	0.92±0.01 ^b	1.05±0.01 ^a
Ash, %	—	0.49±0.01 ^a	0.38±0.01 ^b	0.32±0.01 ^c	0.24±0.01 ^d
Estimated calories, kcal/100g	—	166.42±0.50 ^a	153.32±0.45 ^b	142.64±0.47 ^c	132.50±0.48 ^d
Total Plate Count, log CFU/g	—	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00

Note: All values are expressed as mean±SD ($n = 3$).

Control (traditional jam): 45 % strawberry, 55 % sugar.

Trial 1: 45 % strawberry, 12 % sugar, 18 % added water, 25 % psyllium husk solution.

Trial 2: 45 % strawberry, 26 % sugar, 4 % added water, 25 % psyllium husk solution.

Trial 3: 45 % strawberry, 30 % sugar, no added water, 25 % psyllium husk solution.

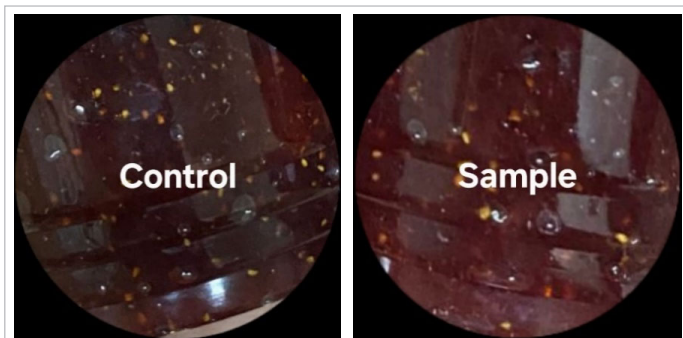


Figure 3. Control and modified sample (Trial 3)

Рисунок 3. Контрольный и модифицированный образец (опыт 3)

The stepwise increase in Brix from Trial 1 (55 %) to Trial 3 (63 %) demonstrates how sugar concentration governs soluble solids and gel formation.

Psyllium husk absorbed 46 ml of water/g, demonstrating its high hydration potential. This contributed to improved consistency, enhanced mouthfeel, and water retention in low-sugar formulations. Its high swelling index mimics sugar's bulking effect, critical for maintaining jam structure without synthetic additives [33].

The reduction of sugar content from 26 % to 12 % led to a progressive decline in total carbohydrates, from 41.93 g/100g in the control sample to 33.65 g/100g in Trial 3. Conversely, the crude fiber content increased to 1.05 g/100g in the final trial, attributed to the incorporation of psyllium husk. These findings are consistent with recent studies on fiber-enriched fruit jellies, which demonstrate that lowering sugar while supplementing with dietary fiber not only significantly reduces total carbohydrate content but also increases fiber levels compared to conventional formulations. Such modifications have been shown to create products better suited for health-conscious consumers seeking functional foods that support glycemic control and digestive health. The use of psyllium, in particular, is highlighted for its positive impact on both nutritional profile and physiological benefits, including improved glycemic response and gastrointestinal function [34,35].

Ash content, which reflects the total mineral residue, decreased from 0.49 % in the control sample to 0.24 % in Trial 3. Although ash content is not a direct indicator of nutritional superiority, its reduction in psyllium-rich formulations suggests fewer added salts and minerals, aligning well with current trends in clean-label product development. Similar trends have been reported by other authors, where ash content in fruit jams typically ranges from 0.20 % to 0.34 %, and lowering mineral additives is associated with a cleaner nutritional label and often perceived as more natural by consumers. Additionally, studies have shown that the ash concentration can decrease due to both the use of fewer added mineral ingredients and potential leaching losses during processing. These values are consistent with dietetic and functional jams developed using natural fiber sources, further supporting the results found in the present study [36,37].

All samples maintained low total plate counts (<1.0 log CFU/g), indicating excellent microbiological safety. Controlled processing steps such as heating and hygienic packaging, combined with pH values below 3.0 and the hygroscopic properties of psyllium, contributed to the shelf stability of the products. The microbial load remained well within established limits for commercial jams, validating the preservative efficacy of low pH and proper formulation practices. These results are consistent with other studies on fruit jams, which report total plate counts

below critical thresholds and emphasize the role of acidity, processing, and packaging in ensuring microbiological safety and extended shelf life. Therefore, the findings confirm that applying low pH and strict hygienic measures is effective for preserving jam quality and safety, in accordance with industry and regulatory standards [38,39]. The calculated energy values of the strawberry jam samples demonstrated a clear inverse relationship between sugar content and caloric value. The control sample, containing the highest total carbohydrates (41.93 g/100 g), exhibited the highest energy content at 166.42 kcal/100g. In contrast, Trial 3, formulated with reduced sugar and enriched with psyllium husk, had the lowest carbohydrate content (33.65 g/100g) and consequently the lowest caloric value at 132.50 kcal/100g. This caloric reduction aligns with the functional role of psyllium husk, which not only contributes dietary fiber but also enables sugar reduction without compromising texture. Comparable studies on reduced-calorie jams prepared with alternative bulking fibers and sweeteners, such as maltitol or apple pomace, report pronounced decreases in both carbohydrate and energy values, ranging from a typical jam value of 136–263 kcal/100 g and carbohydrate levels of 65–73 g/100 g, down to 96–156 kcal/100 g and carbohydrate contents as low as 22–33 g/100 g for fiber-enriched or sugar-reduced formulations. The incorporation of psyllium or similar dietary fibers thus effectively enhances the nutritional profile of jam, making it more suitable for health-conscious consumers and those aiming to follow low-calorie or diabetic-friendly diets [33,36,40–42].

3.2 Sensory evaluation

The sensory evaluation results presented in Table 4 reveal distinct consumer preferences and demonstrate the success of using psyllium husk as a functional ingredient in reduced-sugar strawberry jam formulations. All sensory attributes (taste, odor, color, spreadability, and overall acceptability) were evaluated on a 9-point hedonic scale, with Trial 3 emerging as the most favored formulation across the board.

Table 4. Sensory evaluation scores

Таблица 4. Баллы органолептической оценки

Parameter	Control	Trial 1	Trial 2	Trial 3
Taste	6.60±0.20 ^d	7.10±0.18 ^c	7.46±0.19 ^b	8.03±0.16 ^a
Odor	6.80±0.15 ^d	7.10±0.12 ^c	7.45±0.13 ^b	7.86±0.12 ^a
Color	7.42±0.14 ^d	7.58±0.15 ^c	7.85±0.14 ^b	8.14±0.11 ^a
Spreadability	5.60±0.20 ^d	6.12±0.18 ^c	6.78±0.17 ^b	7.40±0.15 ^a
Overall Acceptability	6.93±0.22 ^d	7.31±0.20 ^c	7.76±0.21 ^b	8.15±0.17 ^a

Note: All values are expressed as mean ± SD (n = 3).

Control (traditional jam): 45 % strawberry, 55 % sugar

Trial 1: 45 % strawberry, 12 % sugar, 18 % added water, 25 % psyllium husk solution.

Trial 2: 45 % strawberry, 26 % sugar, 4 % added water, 25 % psyllium husk solution.

Trial 3: 45 % strawberry, 30 % sugar, no added water, 25 % psyllium husk solution.

Taste scores were highest in Trial 3 (8.03±0.16), which contained 30 % sugar and no added water, indicating that consumers appreciated the sweet intensity balanced by the natural tartness of the strawberries and the gel-forming properties of psyllium. The sugar level, although reduced compared to traditional jams, provided adequate sweetness without overpowering the natural fruit flavor. This demonstrates that psyllium husk

can effectively contribute to mouthfeel and gel structure, allowing for reduced sugar usage without sacrificing palatability.

Odor was also highly rated in Trial 3 (7.86±0.12), suggesting that the formulation preserved volatile aromatic compounds well. The limited water content in this trial likely contributed to the concentration and retention of fruit aroma, which plays a key role in consumer satisfaction [26].

Spreadability is a fundamental functional attribute that significantly influences jam quality and consumer acceptance. In our study, Trial 3 exhibited a notable improvement in spreadability (7.40±0.15) compared to the control (5.60±0.20). This enhancement is primarily attributed to the high water absorption and gel-forming capabilities of psyllium husk, which provided the jam with a smooth, cohesive texture without the use of artificial thickeners or pectin, thereby promoting ease of application on bread and pastries and facilitating consumer convenience. These results closely align with previously published research, where spreadability values for jams ranged from 5.8 to 7.0, and the incorporation of natural fibers or alternative thickeners, such as psyllium husk or xanthan gum, consistently led to noticeable improvements in spreadability relative to conventional pectin-based jams. For instance, pineapple-carrot and black plum peel jams fortified with dietary fibers achieved elevated spreadability scores, reaching up to 7.0±0.2 and 6.9±0.4, respectively, highlighting the positive impact of natural hydrocolloids on texture and consumer experience [43–45]. Collectively, the evidence demonstrates that psyllium husk represents a highly effective natural option for enhancing the spreadability and texture of jam. This approach results in superior functional and sensory qualities compared to traditional formulations, while maintaining desirable taste and user-friendliness attributes that contribute positively to consumer satisfaction and product competitiveness.

Overall acceptability, the most integrative parameter, reached its peak in Trial 3 (8.15±0.17), reflecting high consumer satisfaction across all sensory dimensions. These results validate the potential of psyllium husk as a multifunctional dietary fiber that enhances both the health value and the sensory properties of fruit preserves.

In summary, Trial 3 successfully combined reduced sugar content with enhanced sensory quality, making it a promising candidate for health-conscious consumers seeking lower-calorie, high-fiber fruit spreads without compromising taste, texture, or appearance. Its strong performance in the sensory evaluation supports its marketability as a nutritionally improved alternative to traditional jams.

4. Conclusion

In conclusion, incorporating psyllium husk into strawberry jam formulations effectively enhances nutritional quality by increasing dietary fiber and reducing sugar content without compromising sensory attributes. Trial 3, with 30 % sugar and psyllium addition, demonstrated superior taste, color, spreadability, and overall acceptability, meeting consumer preferences for healthier, low-calorie options. Physicochemical analysis confirmed acceptable pH, color stability, and microbial safety, supporting product shelf-life and quality. This study highlights psyllium husk's potential as a natural functional ingredient to develop fiber-enriched, reduced-sugar fruit spreads, offering a promising alternative for health-conscious consumers seeking nutritious and enjoyable jam products. Future studies are recommended to investigate the shelf life under accelerated storage conditions and evaluate consumer acceptance at a commercial scale.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / REFERENCES

- Shojaee, F. M., Kazemi, E. M., Nosrati, H., Kolahi, M., Haghi, M. (2023). Evaluation of phytochemicals and the role of oxidative stress pathways during fruit development in strawberries (*Fragaria × ananassa*). *Turkish Journal of Botany*, 47(5), 342–352. <https://doi.org/10.55730/1300-008X.2772>
- Charoenwoodhipong, P., Zuelch, M. L., Keen, C. L., Hackman, R. M., Holt, R. R. (2025). Strawberry (*Fragaria × Ananassa*) intake on human health and disease outcomes: A comprehensive literature review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 65(25), 4884–4914. <https://doi.org/10.1080/10408398.2024.2398634>
- Yuan, H., Yu, H., Huang, T., Shen, X., Xia, J., Pang, F. et al. (2019). The complexity of the *Fragaria × ananassa* (octoploid) transcriptome by single-molecule long-read sequencing. *Horticulture Research*, 6, Article 46. <https://doi.org/10.1038/s41438-019-0145-3>
- Hasiów-Jaroszewska, B., Zarzyńska-Nowak, A. (2024). Stralarivirus fragariae (latent ring spot of strawberry). *CABI Compendium*, 2024. <https://doi.org/10.1079/cabicompendium.5220>
- Milosavljević, D., Maksimović, V., Milivojević, J., Djekić, I., Wolf, B., Zuber, J. et al. (2023). Sugars and organic acids in 25 strawberry cultivars: Qualitative and quantitative study. *Plants*, 12(12), Article 2238. <https://doi.org/10.3390/plants12122238>
- Newerli-Guz, J., Śmiechowska, M., Drzewiecka, A., Tylingo, R. (2023). Bioactive ingredients with health-promoting properties of strawberry fruit (*Fragaria × ananassa* Duchesne). *Molecules*, 28(6), Article 2711. <https://doi.org/10.3390/molecules28062711>
- Giampieri, F., Forbes-Hernandez, T. Y., Gasparrini, M., Afrin, S., Cianciosi, D., Reboledo-Rodriguez, P. et al. (2017). The healthy effects of strawberry bioactive compounds on molecular pathways related to chronic diseases. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1398(1), 62–71. <https://doi.org/10.1111/nyas.13373>
- Priyadarshi, R., Jayakumar, A., de Souza, C. K., Rhim, J. W., Kim, J. T. (2024). Advances in strawberry postharvest preservation and packaging: A comprehensive review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 23(4), Article e13417. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.13417>
- Shahat, M., Ibrahim, M.I., Osheba, A.S., Taha, I.M. (2020). Improving the quality and shelf-life of strawberries as coated with nano-edible films during storage. *Al-Azhar Journal of Agricultural Research*, 45(2), 1–14. <https://doi.org/10.21608/ajar.2020.149403>
- Awulachew, M. T. (2021). Fruit jam production. *International Journal of Food Science, Nutrition and Dietetics*, 10(4), 532–537. <https://doi.org/10.19070/2326-3350-2100092>
- WHO (2025). WHO Sugar Recommendations. Retrieved from <https://www.ages.at/en/human/nutrition-food/nutrition-recommendations/who-sugar-recommendations> Accessed October 8, 2025.
- WHO (2015). WHO calls on countries to reduce sugars intake among adults and children. Retrieved from <https://www.who.int/news/item/04-03-2015-who-calls-on-countries-to-reduce-sugars-intake-among-adults-and-children> Accessed October 8, 2025.

13. Huang, Y., Chen, Z., Chen, B., Li, J., Yuan, X., Li, J. et al. (2023). Dietary sugar consumption and health: Umbrella review. *BMJ*, 381, Article e071609. <https://doi.org/10.1136/bmj-2022-071609>
14. WHO. e-Library of Evidence for Nutrition Actions (eLENA). (2023). Reducing free sugars intake in adults to reduce the risk of noncommunicable diseases. Retrieved from <https://www.who.int/tools/elena/interventions/free-sugars-adults-ncds> Accessed October 8, 2025
15. Beikzadeh, S., Peighambari, S. H., Beikzadeh, M., Javar-Abadi, M. A., Homayouni-Rad, A. (2016). Effect of psyllium husk on physical, nutritional, sensory, and staling properties of dietary prebiotic sponge cake. *Czech Journal of Food Sciences*, 34(6), 534–540. <https://doi.org/10.17221/551/2015-CJFS>
16. Chen, X., Gao, X., Chen, J., Liu, Y., Song, C., Liu, W. et al. (2022). Application of psyllium husk as a friendly filtrate reducer for high-temperature water-based drilling fluids. *ACS Omega*, 7(32), 27787–27797. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c04999>
17. Belorio, M., Gómez, M. (2021). Psyllium: A useful functional ingredient in food systems. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 62(2), 527–538. <https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1822276>
18. Gordon, D. (2020). FDA approval of added fiber as dietary fiber. *Current Developments in Nutrition*, 4(Suppl. 2), 632–632. <https://doi.org/10.1093/cdn/nzaa049.025>
19. Brody, T. (2016). Food and dietary supplement package labeling — Guidance from FDA's warning letters and title 21 of the Code of Federal Regulations. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 15(1), 92–129. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12172>
20. Rodrigues, L. M., de Souza, D. F., da Silva, E. A., de Oliveira, T. O., de Lima, J. P. (2017). Physical and chemical characterization and quantification of bioactive compounds in berries and berry jams. *Semina: Ciências Agrárias*, 38(4), 1853–1864. <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2017v38n4p1853>
21. Ogunlade, A. O., Oluwafemi, G. I. (2021). Production and evaluation of jam produced from plum and African Star apple blends. *Food Research*, 5(4), 93–98. [https://doi.org/10.26656/fr.2017.5\(4\).031](https://doi.org/10.26656/fr.2017.5(4).031)
22. Agrawal, R. (2021). Psyllium: A source of dietary fiber. Chapter in a book: Dietary Fibers. IntechOpen, 2021. <https://doi.org/10.5772/intechopen.99372>
23. Fu, Q.-q., Liu, R., Zhou, L., Zhang, J.-w., Zhang, W.-g., Wang, R.-r. (2022). Effects of psyllium husk powder on the emulsifying stability, rheological properties, microstructure, and oxidative stability of oil-in-water emulsions. *Food Control*, 134, Article 108716. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2021.108716>
24. Vukoja, J., Pichler, A., Kopjar, M. (2019). Stability of anthocyanins, phenolics and color of tart cherry jams. *Foods*, 8(7), Article 255. <https://doi.org/10.3390/foods8070255>
25. Codex Standard for Jams (Fruit Preserves) And Jellies (Codex Stan 79–1981). Retrieved from https://www.fao.org/input/download/standards/11254/CXS_296e.pdf Accessed October 8, 2025
26. 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.
27. AOAC. (2005). Association of Official Analytical Chemists-Official methods of analysis (18th ed.). Washington, DC: AOAC, 2005.
28. Ali, M. A., Hashish, M. H., Fekry, M. M. (2023). Microbiological quality of some packed and unpacked bread products in Alexandria, Egypt. *Journal of the Egyptian Public Health Association*, 98(1), Article 16. <https://doi.org/10.1186/s42506-023-00141-9>
29. Wichchukit, S., O'Mahony, M. (2015). The 9-point hedonic scale and hedonic ranking in food science: Some reappraisals and alternatives. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 95(11), 2167–2178. <https://doi.org/10.1002/jsfa.6993>
30. Mishra, P., Singh, U., Pandey, C. M., Mishra, P., Pandey, G. (2019). Application of Student's t-test, analysis of variance, and covariance. *Annals of Cardiac Anaesthesia*, 22(4), 407–411. https://doi.org/10.4103/aca.ACA_94_19
31. Noman, A. H., Mahin, M. I., Rashid, M. H. A. (2024). Development and consumer acceptance of date jam enriched with apple and orange. *Malaysian Journal of Halal Research*, 7(2), 36–41. <http://doi.org/10.26480/mjhr.02.2024.36.41>
32. Figueroa, L. E., Genovese, D. B. (2020). Structural and sensory analysis of compositionally optimized apple jellies enriched with dietary fibre compared to commercial apple jams. *Journal of Food Science and Technology*, 57(5), 1661–1670. <https://doi.org/10.1007/s13197-019-04199-2>
33. Kassa, M.G., Teferi, D.A., Asemu, A. M., Belachew, M. T., Sathesh, N., Abera, B. D. et al. (2024). Review on psyllium husk: Nutritional, functional, health benefits, food industry applications, waste treatment, and potential negative effects. *CyTA-Journal of Food*, 22(1), Article 2409174. <https://doi.org/10.1080/19476337.2024.2409174>
34. Figueroa, L. E., Genovese, D. B. (2019). Fruit jellies enriched with dietary fibre: Development and characterization of a novel functional food product. *LWT*, 111, 423–428. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.05.031>
35. Abutair, A. S., Naser, I. A., Hamed, A. T. (2016). Soluble fibers from psyllium improve glycemic response and body weight among diabetes type 2 patients (randomized control trial). *Nutrition Journal*, 15(1), Article 86. <https://doi.org/10.1186/s12937-016-0207-4>
36. Ho, L.-H., Yasmira, I., Norlia, M. (2020). Proximate composition, physicochemical characteristics and sensory evaluation of reduced-calorie belimbi fruit (*Averrhoa belimbi*) jam with maltitol. *Food Research*, 4(5), 1545–1553. [https://doi.org/10.26656/fr.2017.4\(5\).090](https://doi.org/10.26656/fr.2017.4(5).090)
37. Yadav, M., Hossain, S. A., Bharti, B.K., Jaiswal, M. (2018). Comparative study of physico-chemical property in different brands of jam, honey and jelly. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 7(5), 2186–2191.
38. Brandão, T. M., do Carmo, E. L., Elias, H. E. S., de Carvalho, E. E. N., Borges, S. V., Martins, G. A. S. (2018). Physicochemical and microbiological quality of dietetic functional mixed cerrado fruit jam during storage. *The Scientific World Journal*, 2018(1), Article 2878215. <https://doi.org/10.1155/2018/2878215>
39. Kayshar, M. S., Saifullah, M., Rahman, A., Uddin, M. B. (2014). An overview of quality status of selected commercial brands of juices and jams based on public perception and laboratory analysis. *Journal of the Bangladesh Agricultural University*, 12(1), 183–188. <https://doi.org/10.3329/jbau.v12i1.21410>
40. Abolila, R. M., Barakat, H., El-Tanahy, H. A., El-Mansy, H. A. (2015). Chemical, nutritional and organoleptical characteristics of orange-based formulated low-calorie jams. *Food and Nutrition Sciences*, 6(13), 1229–1244. <https://doi.org/10.4236/fns.2015.613129>
41. Banaś, A., Korus, A., Tabaszewska, M. (2018). Quality assessment of low-sugar jams enriched with plant raw materials exhibiting health-promoting properties. *Journal of Food Science and Technology*, 55(1), 408–417. <https://doi.org/10.1007/s13197-017-2952-6>
42. Shinwari, K. J., Rao, P. S. (2020). Development of a reduced-calorie high pressure processed sapodilla (*Manilkara zapota* L.) jam based on rheological, textural, and sensory properties. *Journal of Food Science*, 85(9), 2699–2710. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.15364>
43. Ogori, A.F., Amove, J., Evi-Parker, P., Sardo, G., Okpala, C.O.R., Bono, G. et al. (2021). Functional and sensory properties of jam with different proportions of pineapple, cucumber, and *Jatropha* leaf. *Foods and Raw Materials*, 9(1), 192–200. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2021-1-192-200>
44. Mohammadi-Moghaddam, T., Firoozzare, A., Daryadar, S., Rahmani, Z. (2020). Black plum peel jam: Physicochemical properties, sensory attributes, and antioxidant capacity. *International Journal of Food Properties*, 23(1), 1737–1747. <https://doi.org/10.1080/10942912.2020.1830798>
45. Maimaitiyming, R., Zhang, H., Wang, J., Wang, L., Zhao, L., Liu, B. et al. (2024). A novel strategy for mixed jam evaluation: Apparent indicator, sensory, metabolic, and GC-IMS analysis. *Foods*, 13(7), Article 1104. <https://doi.org/10.3390/foods13071104>

AUTHOR INFORMATION	СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ
Affiliation	Принадлежность к организации
Ahmed A. Baioumy , Assistant Professor, Department of Food Science, Faculty of Agriculture, Cairo University 1 Gamaa Street, 12613, Giza, Egypt E-mail: ahmedadel35@agr.cu.edu.eg ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2909-603X	Баюми Ахмед А. — доцент, кафедра пищевых наук, сельскохозяйственный факультет, Каирский университет 12613, Египет, Гиза, ул. Гамаа, 1 E-mail: ahmedadel35@agr.cu.edu.eg ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2909-603X
Fayrouz A. Abdeldayem , Graduate, Department of Food Science, Faculty of Agriculture, Cairo University 1 Gamaa Street, 12613, Giza, Egypt E-mail: fayrouzabdelhamid56@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0009-0006-2568-4404	Абдельдайем Файруз А. — выпускник, кафедра пищевых наук, сельскохозяйственный факультет, Каирский университет 12613, Египет, Гиза, ул. Гамаа, 1 E-mail: fayrouzabdelhamid56@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0009-0006-2568-4404
Tasneem T. Abdelfattah , Graduate, Department of Food Science, Faculty of Agriculture, Cairo University 1 Gamaa Street, 12613, Giza, Egypt E-mail: tasnimtarekk24@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0009-0003-5388-4778	Абдельфаттах Тасним Т. — выпускник, кафедра пищевых наук, сельскохозяйственный факультет, Каирский университет 12613, Египет, Гиза, ул. Гамаа, 1 E-mail: tasnimtarekk24@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0009-0003-5388-4778
Maria M. Aziz , Graduate, Department of Food Science, Faculty of Agriculture, Cairo University 1 Gamaa Street, 12613, Giza, Egypt E-mail: mariamaher652@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0009-0002-4264-6312	Азиз Мария З. — выпускник, кафедра пищевых наук, сельскохозяйственный факультет, Каирский университет 12613, Египет, Гиза, ул. Гамаа, 1 E-mail: mariamaher652@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0009-0002-4264-6312
Rawan R. Hamed , Graduate, Department of Food Science, Faculty of Agriculture, Cairo University Egypt 1 Gamaa Street, 12613, Giza, Egypt. E-mail: rawanramadan64@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0009-0005-1748-9919	Хамед Раван Р. — выпускник, кафедра пищевых наук, сельскохозяйственный факультет, Каирский университет 12613, Египет, Гиза, ул. Гамаа, 1 E-mail: rawanramadan64@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0009-0005-1748-9919

AUTHOR INFORMATION		СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ	
Affiliation		Принадлежность к организации	
Yasmine H. Yousef , Graduate, Department of Food Science, Faculty of Agriculture, Cairo University 1 Gamaa Street, 12613, Giza, Egypt E-mail: yasmineayad2.6@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0009-0007-3753-6414		Юсеф Ясмин Х. — выпускник, кафедра пищевых наук, сельскохозяйственный факультет, Каирский университет 12613, Египет, Гиза, ул. Гамаа, 1 E-mail: yasmineayad2.6@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0009-0007-3753-6414	
Tarek G. Abdelmaksoud , Associate Professor, Department of Food Science, Faculty of Agriculture, Cairo University 1 Gamaa Street, 12613, Giza, Egypt E-mail: tareekgamal_88@agr.cu.edu.eg ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7012-6667 * corresponding author		Абедельмаксуд Тарек Г. — адъюнкт-профессор, кафедра пищевых наук, сельскохозяйственный факультет, Каирский университет 12613, Египет, Гиза, ул. Гамаа, 1 E-mail: tareekgamal_88@agr.cu.edu.eg ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7012-6667 * автор для контактов	
Contribution		Критерии авторства	
The author has the sole responsibility for writing the manuscript and is 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/10.21323/2618-9771-2025-8-4-583-594>

Поступила 03.08.2025

Поступила после рецензирования 10.12.2025

Принята в печать 12.12.2025

© Ульрих Е. В., Сухих С. А., Самусев И. Г., Бабищ О. О., 2025

<https://www.fsjour.com/jour>

Обзорная статья

Открытый доступ

СКВАЛЕН — ПРИРОДНЫЙ БИОЛОГИЧЕСКИ АКТИВНЫЙ КОМПОНЕНТ ПИТАНИЯ В XXI ВЕКЕ

Ульрих Е. В.^{1*}, Сухих С. А.², Самусев И. Г.², Бабищ О. О.²¹ Калининградский государственный технический университет, Калининград, Россия² Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград, Россия

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: АННОТАЦИЯ

получение сквалена,
свойства сквалена,
источники сквалена,
функциональные
продукты питания,
биологически
активные свойства

Сквален — углеродсодержащее органическое соединение тритерпенового ряда, являющийся предшественником многих витаминов, гормонов и стероидов у млекопитающих, растений, грибов и бактерий. Цель настоящего литературного обзора — систематизировать данные о физико-химических свойствах сквалена, его источниках и методах получения, а также показать преимущества его применения в рецептурах современных функциональных продуктов питания и нутриентов. Сквален легко окисляется молекулярным кислородом, в результате чего двойные связи переходят в окисленную форму посредством цепных реакций, при которых π -связи / π -связи (ненасыщенные атомы углерода) разрываются и к ним присоединяются активные радикалы кислорода, образуя насыщенные формы молекулы. Особенно много сквалена содержится в растительных маслах плодов оливы, амаранта, пальмы, а также в маслах бобов люпина и зародышей риса. Сквален участвует в биосинтезе фитостерола и холестерина, витамина Д, защищает кожу человека от УФ-облучения и иного окислительного воздействия, регулирует работу сердечно-сосудистой системы, обладает способностью улавливать свободные радикалы и связывать токсические соединения и канцерогены. В случае применения экзогенного сквалена можно замедлить рост опухолевых клеток и снизить отрицательное влияние окислительного стресса. В данном исследовании представлены основные физико-химические свойства природного сквалена, приведены сведения о различных источниках и стратегиях его получения. В статье обсуждается терапевтический потенциал сквалена и перспективы его применения в рецептуре современных функциональных продуктов питания и нутриентов. Настоящее исследование может способствовать выявлению новых направлений в области получения сквалена из растительного сырья, бактерий, грибов и микроводорослей. Кроме того, оно формирует научный задел для разработки стратегий повышения стабильности и биодоступности сквалена, а также инженерных подходов к крупномасштабному производству функциональных продуктов и нутриентов на его основе.

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

Received 03.08.2025

Accepted in revised 10.12.2025

Accepted for publication 12.12.2025

© Ulrikh E. V., Sukhikh S. A., Samusev I. G., Babich O. O., 2025

Available online at <https://www.fsjour.com/jour>

Review article

Open access

SQUALENE — A NATURAL BIOLOGICALLY ACTIVE COMPONENT OF NUTRITION OF THE 21st CENTURY

Elena V. Ulrikh^{1*}, Stanislav A. Sukhikh², Ilya G. Samusev², Olga O. Babich²¹ Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia² Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia

KEYWORDS:

obtaining squalene,
properties of squalene,
sources of squalene,
functional foods,
biologically active
properties

ABSTRACT

Squalene is a carbon-containing organic compound of the triterpene series. It is a precursor of many vitamins, hormones and sterols in a body of mammals, plants, fungi and bacteria. The purpose of this scientific literature review was to systematize data on the physicochemical properties of squalene, sources and methods of its production, as well as to reveal the advantages of using squalene in the formulations of modern functional foods and nutrients. Squalene is easily oxidized by molecular oxygen, as a result of which double bonds are converted into an oxidized form by the chain reactions in which π -bonds or π -bonds (unsaturated carbon atoms) are broken and active oxygen radicals are attached to them; as a result saturated forms of the molecule are produced. Squalene is especially abundant in vegetable oils of olive, amaranth, palm, as well as in lupine bean and rice germ oils. Squalene is involved in the biosynthesis of phytosterol, cholesterol, and vitamin D; it protects human skin from UV radiation and other oxidative effects, regulates the cardiovascular system, has the ability to capture free radicals and bind toxic compounds and carcinogens. In the case of using exogenous squalene, it is possible to slow down the growth of tumor cells and reduce the negative impact of oxidative stress. This study presents the main physicochemical properties of natural squalene, provides information on various sources and various strategies for obtaining squalene. The article discusses the therapeutic potential of squalene and the prospects for its application in the formulation of modern functional food products and nutrients. This study will contribute to the search process for new research directions in the field of obtaining squalene from plant raw materials, bacteria, fungi, microalgae, and will also serve as a potential for the development of strategies for increasing the stability and bioavailability of squalene, as well as the development of engineering approaches to large-scale production of functional foods and nutrients based on squalene.

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

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Ульрих, Е. В., Сухих, С. А., Самусев, И. Г., Бабищ, О. О. (2025). Сквален — природный биологически активный компонент питания 21 века. *Пищевые системы*, 8(4), 583–594. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-4-583-594>

FOR CITATION: Ulrikh, E. V., Sukhikh, S. A., Samusev, I. G., Babich, O. O. (2025). Squalene — a natural biologically active component of nutrition of the 21st century. *Food Systems*, 8(4), 583–594. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-4-583-594>

1. Введение

Сквален (2,6,10,15,19,23-гексаметил-6,6,10,14,18,20-тетракозагексан) относится к тритерпеновым углеводородам и является биохимическим предшественником витаминов, гормонов и стероидных соединений у млекопитающих, растений, грибов и бактерий [1,2]. Особенно много сквалена содержится в растительных маслах плодов оливы, амаранта, пальмы, а также в маслах бобов люпина и зародышей риса [1]. Сквален содержится в организмах ряда рыб и глубоководных акул [3,4], входит в состав кожного сала человека (около 12%), а также присутствует в липидном слое волос и других поверхностных липидов [5,6]. Он участвует в биосинтезе фитостерола и холестерина, витамина Д, защищает кожу человека от УФ-облучения и иного окислительного воздействия [4,6], регулирует работу сердечно-сосудистой системы [7], обладает способностью улавливать свободные радикалы и связывать токсические соединения и канцерогены [6]. Именно поэтому сквален относят к числу ключевых компонентов, которые должны присутствовать в организме в достаточном и стабильном количестве [6]. В сутки организм человека вырабатывает от 125 до 475 мг сквалена. Данного количества достаточно для обеспечения нормального метаболизма и выполнения основных физиологических функций, однако с возрастом синтез сквалена снижается [8]. Поэтому очень важно, чтобы сквален поступал в организм человека из внешних источников — с функциональными продуктами питания, косметическими средствами и нутрицевтиками [6,8]. В работе Cheng и др. показано, что усвоение сквалена из пищи достигает 85%, а рекомендуемая суточная норма потребления составляет 500 мг/сут [8]. В случае применения экзогенного сквалена можно замедлить рост опухолевых клеток и снизить отрицательное влияние окислительного стресса [6]. Поэтому очень важно разрабатывать функциональные продукты питания, нутрицевтики и другие средства, в состав которых будет входить природный сквален.

В настоящее время сквален получают из тканей млекопитающих и растений [4]. Печень глубоководных акул остается наиболее распространенным животным сырьем для получения сквалена [9,10]. Именно из печеночного масла акул сквален был выделен впервые [8]. Такой способ экстракции отличается технологической простотой, низкой себестоимостью и высоким выходом: более 98% чистого вещества получают при однократной вакуумной перегонке при (200–300) °C [3]. Для получения 1 тонны сквалена необходимо примерно 3000 акул [8,10]. Безусловно, это негативно сказывается на их популяции и представляет собой угрозу для морской экосистемы [3,5]. Кроме того, как отмечено в работе Рора и др. [4], содержание стойких органических загрязнений в сквалене, полученном из тканей морских животных (в частности, акул), может стать причиной инфицирования человека. Поэтому необходимо добывать сквален из других, более гуманных и экологических источников, таких как растения и микроорганизмы [3].

Однако технологии получения сквалена из растительного сырья пока не обеспечивают объемы, достаточные для удовлетворения растущего спроса. Поэтому в последнее время активно развиваются направления, связанные с получением коммерческого сквалена с помощью микробных биопроцессов [9,11,12]. При этом источниками сквалена могут выступать как природные микроорганизмы (бактерии и грибы), так и сконструированные их штаммы. Сконструированные микробные платформы отличаются большей производительностью сквалена по сравнению с нативными штаммами микроорганизмов (*Saccharomyces cerevisiae*, *Halobacterium cutirubrum*, *Torulaspora delbrueckii*, *Aurantiochytrium* sp.) [9,13]. Так, выход сквалена из липидных экстрактов лизиса клеток штамма *T. delbrueckii* составил 237,25 мкг/г сухого веса дрожжевых клеток, а из липидного экстракта штамма *S. cerevisiae* — 41,16 мкг/г сухого веса дрожжевых клеток [14].

В генномодифицированные микроорганизмы добавлен ген для модификации естественного процесса биосинтеза сквалена, в результате чего микроорганизмы являются сверхпродукентами данного вещества [9,15]. В своей работе Paramasivan и Mutturuzи указывают, что генномодифицированные штаммы *Saccharomyces cerevisiae* и *Yarrowia lipolytica* используются как продуценты сквалена [13]. Однако применение микроорганизмов для синтеза сквалена ограничено такими факторами, как низкий выход целевого продукта, высокие производственные затраты, отсутствие оптимальных параметров культивирования микроорганизмов, отсутствие экономически эффективных производственных платформ [3].

Хотелось бы отметить, что природный сквален, выделенный из масла печени акул, из растений, микроорганизмов, не стабилен в присутствии кислорода воздуха, при повышенных температурах,

окисляется при взаимодействии со светом и с различными металлами. Поэтому очень важно разрабатывать новые технологические подходы, направленные на повышение эффективности и экологичности процессов получения сквалена из природных источников, обеспечение их гуманности, снижение себестоимости, а также на уменьшение содержания примесей в конечном продукте. Это может быть достигнуто посредством сравнительного анализа при помощи современных разработок и технологий.

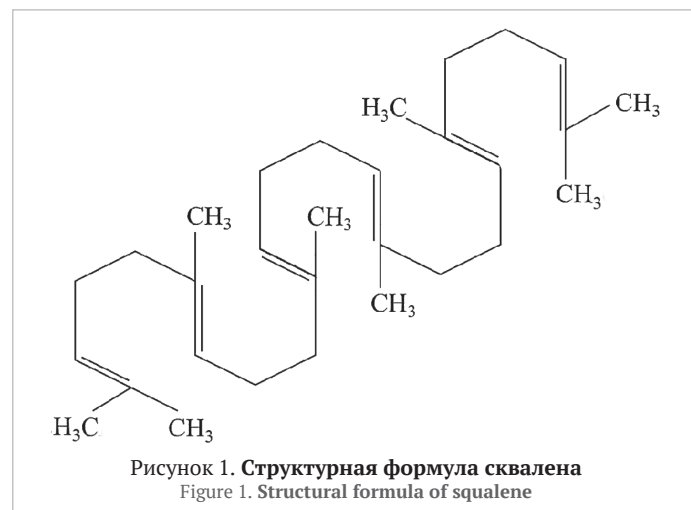
Целью настоящего литературного обзора стала систематизация данных о физико-химических свойствах сквалена, об источниках и методах его получения, а также раскрытие преимуществ применения сквалена в рецептурах современных функциональных продуктов питания и нутриентов.

2. Объекты и методы

Объектами исследования являлись научные публикации и отчеты российских и зарубежных авторов, касающиеся исследований сквалена. Для поиска информации были использованы базы данных Scopus, Web of Science, PubMed, Elibrary за период с начала 1940-х годов (появление первой публикации по теме) до 01.06.2025 г. Были отобраны и проанализированы обзорные и исследовательские статьи, посвященные физико-химическим и биологическим свойствам сквалена, полученного из семян люпина, а также работы, раскрывающие актуальность темы, особенности методов получения сквалена и перспективные направления исследований в данной области, на английском и русском языках. Основное внимание уделялось статьям, опубликованным в научных рецензируемых журналах с высоким индексом цитирования за последние пять лет. При проведении анализа использовали также материалы конференций и главы из книг. В системе PubMed был проведен поиск исследований, опубликованных в период 1950–2025 гг., с использованием следующих комбинаций ключевых слов: получение сквалена, свойства сквалена, источники сквалена, функциональные продукты питания, биологически активные свойства. Использовались статьи, доступные в виде рефератов, а также библиографии, редакционные материалы и статьи, опубликованные не на английском и русском языках. Основным методом служило обобщение данных. Были проанализированы обзорные и исследовательские данные, относящиеся к исследованию источников получения сквалена, его антибактериальных, детоксикационных, противовоспалительных (иммуномодулирующих), антиоксидантных, противоопухолевых свойств. Авторами были рассмотрены гипотезы ведущих ученых об использовании сквалена в качестве ингредиента функциональных продуктов питания, сформировано собственное мнение на основе доказательства данных гипотез.

3. Химическая природа сквалена и физико-химические свойства

Биомолекула сквалена была открыта в 1906 году Мицумару Цудзимото, японским инженером-промышленником [16]. В 1916 году Цудзимото впервые выделил сквален из масла печени акулы (включая *Squalus mitsukurii* и другие сквалоиды) [17]. Сквален представляет собой липофильный полиненасыщенный тритерпен со сложной структурной (Рисунок 1) и эмпирической формулой ($C_{30}H_{50}$) [18,19].



Второе название сквалена — 2,6,10,15,19,23-гексаметил-6,6,10,14,18,20-тетракозагексан [1,2,16]. Он образован шестью изопреновыми единицами, поэтому является 30-углеродным изопреноидным соединением с шестью двойными связями [19,20], которые обуславливают его высокую степень ненасыщенности и чувствительность к окислению [2]. Благодаря высокой концентрации шести углеродных двойных связей молекула сквалена легко окисляется молекулярным кислородом: в ходе цепных реакций двойные связи переходят в окисленную форму, при этом π-связи разрываются, а к атомам углерода присоединяются активные кислородные радикалы, образуя насыщенные производные молекулы [2,21,22]. Следует также отметить существование альтернативного пути улавливания кислорода, обусловленного самогидролитическими процессами. В результате этих процессов образуются пероксиды, а рассматриваемые механизмы объясняют антиоксидантные свойства сквалена [2,21,22]. При контакте с кислородом сквален реагирует на соединения с нежелательными свойствами [23]. Так, в работе Psomiadou и Tsimidou [24] показан антиоксидантный эффект сквалена в оливковом масле. Также исследователями доказано, что в реакциях окисления сквален может конкурировать с жирными кислотами [2], но данный процесс недостаточно изучен и требует большего внимания.

Другие физико-химические свойства сквалена, обусловленные его структурой, представлены в Таблице 1 [2]. Сквален — бесцветная маслянистая жидкость, без запаха, не растворимая в воде, но хорошо растворимая в неполярных органических растворителях [2,19,25,26]. Рентгеновская кристаллическая структура сквалена указывает на симметричную, вытянутую конформацию [27]. Выявлено, что сквален нестабилен при нагревании и чувствителен к свету [28]. Общая константа скорости гашения синглетного кислорода ($k_t + k_q$) сквалена составила $3,8 \times 10^7$ м/с [29]. Yao с соавторами [29] отметили, что физические и химические механизмы гашения в равной степени способствуют общему тушению синглетного кислорода. Четырнадцать продуктов деградации сквалена были идентифицированы при температуре 180 °C с помощью газовой хроматографии — масс-спектрометрии (ГХ–МС).

Таблица 1. Физико-химические свойства сквалена
Table 1. Physicochemical properties of squalene

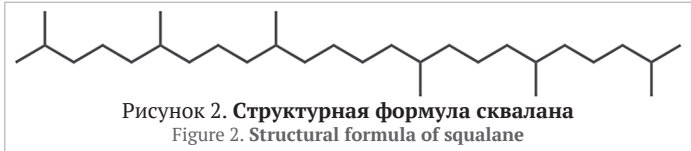
Показатель	Ед. измерения	Значение	Источник
Молекулярная масса	г/моль	410,7	[2]
Плотность	г/см ³	0,855–0,858	[2,27]
Температурой плавления	°C	–20	[2]
Коэффициент распределения октанол/вода (log P)	мг/л	10,67	[27,30]
Растворимости сквалена в воде	мг/л	0,124	[27,30]
Вязкость	сП	~11	[27,30]
поверхностное натяжение	мН/м	~32	[27]

Авторами Martinez-Correa и др. определена растворимость сквалена в сверхкритическом диоксиде углерода [28]. В ходе работы было доказано, что значения растворимости сквалена в SC–CO₂, предсказанные с помощью моделирования методом GC-EOS, совпадали по порядку величины с экспериментальными данными при давлениях ниже 200 бар, а его производимость зависела от значения критического диаметра твердой фазы. Полученные эмпирические данные совпадают по порядку величины с результатами, представленными в работе 1997 года научной группой под руководством Catchpole [31] и Rosales-Garcia [32]. Также выявлено, что результаты Martinez-Correa и др. [28] коррелируют с экспериментальными данными Ruivo (2004), полученными с использованием критических свойств и ацентрического фактора [33]. Кроме того, Proells установил, что растворимость сквалена, как и липидов, почти линейно зависит от температуры [34]. Так, степень растворимости сквалена увеличивалась логарифмически с ростом давления при фиксированной температуре и почти линейно с ростом температуры при фиксированном давлении [34]. Сильная температурная зависимость растворимости позволяет проводить двухстадийное фракционирование экстрактов. Растворимость как функция индивидуального типа растворенного вещества увеличивалась с уменьшением полярности и молекулярной массы.

Анализ научной литературы позволил установить, что сквален из-за его углеводородной и неполярной природы характеризуется более значительной степенью растворимости в диоксиде углерода по сравнению с другими липидами. Показатели растворимости снижаются в случае, если сквален имеет жирорастворимые примеси [35].

Сквален обладает эмульгирующей способностью [36]. Его собственные эмульсии, а также эмульсии сквалана без сополимеров характеризуются очень низкой токсичностью и вызывают мощные реакции антител на несколько антигенов у нечеловеческих приматов. Благодаря этому сквален может быть использован для производства различных вакцин [37,38], включая противораковые, а также в системах доставки лекарственных средств [27].

Сквален гидрогенизируется до сквалана (Рисунок 2).



Гидрирование может быть успешно осуществлено с дополнительным применением сверхкритического диоксида углерода, который служит промоутером для переноса водорода в жидкую фазу и повышает равновесные концентрации сквалана и сквалена в газообразной фазе. Таким образом, можно получить более стабильное производное сквалена — сквалан [23]. Сквален и его гидрогенизированная форма, сквалан, обладают уникальными свойствами, которые идеально подходят для создания стабильных и нетоксичных наноэмульсий. Благодаря этим характеристикам многочисленные эмульсии на основе сквалена были эффективно разработаны для применения в лекарственных средствах и вакцинах [27].

4. Источники получения природного сквалена

Источниками природного терпенового соединения — сквалена — служат растительное и животное сырье [3,5]. Однако по гуманным соображениям и в целях сохранения популяций животных и экосистем в последнее время все большее внимание уделяется использованию бактериальных клеток и микроводорослей для его получения [3,9–14].

4.1. Животные источники получения сквалена

Сквален входит в состав клеточной структуры эукариотических клеток и накапливается в основном в жировой фракции. На его долю приходится 13% от общего количества липидов [39,40]. Поэтому сквален можно получать из липидов животного происхождения (Таблица 2).

Таблица 2. Содержание сквалена в сырье животного происхождения
Table 2. Content of squalene in raw materials of animal origin

Источник сквалена	Количество	Литература
Серая бамбуковая акула, пятнистая акула	6,86 г/ 100 г	[41]
Пятнистохвостая акула	6,53 г/ 100 г	[42]
Морской окунь, полосатый тунец	0,10–0,13 г/ 100 г	[41]
Анчоус	0,20–0,43 мг/100 г сырой массы	[43]
Чилинская ставрида	0,07–0,13 мг/100 г	[43]
Ставрида (<i>Trachurus trachurus</i>)	1,0 мг/100 г	[44]
Скумбрия	0,80–0,19 мг/100 г	[43]
Сыр пармезан	9,6 мг/100 г	[45,46]
Сливочное масло	6,1 мг/100 г	[45,46]
Молоко овечье	1,80 мг/100 г жира	[47]
Грудное молоко	0,0094–0,0120 ммоль/л	[48]
Желток куриного яйца	15–17 мг/ мг сырой массы желтка	[49]

Наилучшим источником сквалена является печень акулы, а именно жир печени [43]. Так, в исследованиях Deprez и др. [50] с помощью газовой хроматографии изучено содержание сквалена в печени особей следующих видов акул: длинноносой (*Centroscyrrnus crepidater*), португальской (*Centroscyrrnus coelolepis*), безымянной карликовой (*Etmopterus* sp. nov.), Оустона (*Centroscyrrnus owstoni*), чешуйчатой акулы-меч (*Centrophorus squamosus*), лопатоносой (*Deania calcea*), Бакстера (*Etmopterus baxteri*) и акулы котятревки (*Dalatias licha*). Установлено, что печень акул содержала большое количество сквалена. В зависимости от вида рыб содержание сквалена варьировалось в диапазоне от 15 до 69% по весу, исключение составила печень акулы *C. squamosus*: содержание сквалена составило всего 1% от массы

печени [50]. Представленные данные согласуются с результатами исследований Bakes и Nichols [51], которые указывают на то, что жиры печени глубоководных акул *Scentrophorus scalpratus*, *Centroscymnus plunketi*, *Etmopterus granulosus*, *Somniosus pacificus*, *Centroscymnus crepidater* и *Deania calcea* содержат сквален в количестве от 50 до 82% жира печени. В исследованиях научного коллектива под руководством Wetherbee и Nichols [52] выявлено, что содержание сквалена в жире печени акулы-змеехвоста (*Dalatis licha*) достигает 80% от массы жира животного. Содержание сквалена в жире печени песчаной акулы (*Carcharhinus plumbeus*), тупорылой шестижаберной акулы (*Hexanchus griseus*), колючей акулы (*Squalus acanthias*) варьировало от 54 до 70% от массы жира. Наиболее богатым источником сквалена является масло печени глубоководных акул семейства *Squalidae* [52].

Как было отмечено ранее, использование акул и других видов рыб для получения сквалена запрещено законом в связи с правилами защиты животных [3,9–14,53,54], а также с риском заражения человека через сквален различными инфекционными заболеваниями и отравления различными органическими загрязнителями, органохлорированными пестицидами, полициклическими ароматическими углеводородами, диоксинами и тяжелыми металлами, вызывающими рак [55,56].

В качестве альтернативного источника сквалена среди животного сырья можно выделить ткани различных видов рыб [43]. Однако в этом исследовании отмечено, что концентрация сквалена в филе ставриды, анчоуса, скумбрии, окуня и других видов рыб намного ниже, чем в печени акулы [43]. Эти результаты согласуются с данными предыдущего исследования, где содержание сквалена в солёно-сушеной рыбе достигало 1,83 мг/100 г, при том, что у большинства образцов оно не превышало 0,4 мг/100 г [55]. Аналогичным образом, другие авторы сообщали о количестве сквалена до 1,0 мг/100 г в сыром филе ставриды (*Trachurus trachurus*) [44].

Хотелось бы также отметить, что сквален не содержится в молочном жире — молоке, поэтому его можно использовать в качестве индикатора фальсификации молочной продукции. При изучении фальсифицированной молочной продукции (в случае добавления пальмового или другого растительного жира) методом газовой и высокоэффективной хроматографии можно обнаружить содержание сквалена с пределом обнаружения до 1% [56]. К аналогичным результатам пришел в своих исследованиях Indyk [57]. Он установил, что молоко содержит сквален в количестве 7 мг на на единицу продукта, принятую за порцию в исследовании [57]. Также французские ученые обнаружили сквален в овечьем молоке. Ими было показано, что овечий молочный жир содержит сквален в количестве 1,80 мг/100 г жира. Результаты исследования показали, что количественный и качественный состав жировых фракций овечьего молока зависит от породы овец и от времени года отбора проб [47]. С помощью газовой хроматографии и масс-спектрометрии было определено, что углеводородная фракция нейтральных липидов козьего молока содержит сквален в количестве 2,5% [58].

В этой связи ткани рыб и другие животные источники сквалена (Таблица 2) не могут быть перспективными для промышленного его получения.

4.2. Растительные источники получения сквалена

Растительные компоненты являются источником пищевых и биологически активных веществ. Как правило, растительные компоненты содержат в себе белки, липиды, пигменты, витамины. В частности, растительные масла помимо триацилглицерина содержат такие вторичные метаболиты, как стерин, токоферолы, полифенолы и сквален [59–61]. Несмотря на их незначительное содержание, они играют важную роль в физиологии человека [61]. Поэтому источником сквалена могут служить как масличные растения и их масла, так и различные злаковые и травяные культуры (Таблица 3). Сквален растительного происхождения имеет значительные преимущества перед скваленом животного происхождения. В частности, сквален растительного происхождения не токсичен, более стабилен, не имеет цвета и запаха [9].

Отмечено, что гексановый экстракт листьев зеленого чая (*Camellia sinensis*) содержал сквален в количестве 29,2 г/кг экстракта [62].

Как видно из Таблицы 3, наибольшее содержание сквалена отмечено в растительном масле амаранта и в кукурузе, однако с коммерческой точки зрения сквален получают из оливы и оливкового масла [2]. При этом следует отметить, что содержание сквалена в оливковом масле первого отжима составляет $491,0 \pm 15,55$ мг/100 г, а в рафинированном оливковом масле — $290,0 \pm 9,89$ мг/100 г [64,65]. Таким образом, можно сделать вывод, что процесс рафинации способствует удалению из растительных масел исследуемого вещества (сквалена) [60,66]

и накоплению его в дистилляте растительных масел [8]. Поэтому дистилляты растительных масел можно использовать в качестве полноценного источника сквалена [4,64]. Так, например, в дистилляте пальмового масла содержание сквалена составляет 2400–13500 мг/л, что значительно выше, чем в пальмовом масле (от 250 до 540 мг/л) [4]. В работе Cheng и др. говорится о том, что пальмовое масло первого отжима содержит сквален в количестве 961,77 мг/100 г [8]. Поэтому так же, как и оливковое масло, пальмовое масло можно считать потенциальным источником сквалена. Однако выделение / извлечение сквалена из растительных масел экономически не выгодно [65].

Таблица 3. Содержание сквалена в растительном сырье

Table 3. Content of squalene in plant raw materials

Растительный источник сквалена	Количество	Литература
Растительное масло амаранта	6300 мг/100 г	[45,46]
Оливковое масло	685,5 мг/100 г	[45,46]
Кукуруза	27,9–5942 мг/100 г	[2,45,46]
Соевое масло	9,9 мг/100 г	[2]
Арахис	27,4 мг/100 г	[2]
Семена тыквы	89,0 мг/100 г	[63]
Пальмовое масло	250–540 мг/л	[4]
Листья зеленого чая	3682 мг/100 г	[6]
Рис		
Зародыши пшеницы	14,1 мг/100 г	[2]
Масло виноградных косточек		

Содержание сквалена в дезодорированном дистилляте оливкового масла составляет от 9970 до 3000 мг/100 г, что примерно в 50–1250 раз больше, чем в оливковом масле. Аналогичное явление наблюдалось для соевого масла, масла рисовых отрубей, подсолнечного масла, пальмового масла и рапсового масла. Это указывает на целесообразность производства сквалена из дезодорированного дистиллята, который может быть использован в качестве выгодного ресурса для повышения ценности промышленных отходов и побочных продуктов [64].

Сквален разрушается в процессе термической обработки растительных масел, поэтому некоторые ученые изучали его содержание в термически обработанных маслах. Так, Kalogeropoulos установил, что во фритюрных (термически обработанных) растительных маслах концентрация сквалена снижалась до значения 5,9 мг/100 г жира [66]. Этот же автор отметил, что в оливковом масле сквален не распадается в процессе кулинарной обработки [66]. Именно поэтому можно считать оливковое масло лучшим источником сквалена, даже несмотря на то, что в процессе рафинации оливкового масла его содержание немного снижается [65].

4.3. Микроорганизмы как источники сквалена

Развитие биотехнологии охватило и направление получения природного тритерпена — сквалена [67]. Согласно современным исследованиям, увеличение спроса на сквален побудило ученых биотехнологов предложить новый источник его получения — микроорганизмы (бактерии, дрожжи и микроводоросли) [67–69]. Такой сквален является хорошей альтернативой сквалену животного и растительного происхождения [3,70]. Однако природные микроорганизмы не способны вырабатывать сквален в больших количествах, поэтому исследователи предложили новые методы и подходы к увеличению выхода сквалена из микроорганизмов [67–69] — например, изменение их генетической конструкции [70] (Таблица 4).

В качестве основных микробиологических продуцентов сквалена выделяют *Saccharomyces cerevisiae* [3], *Saccharomyces uvarum* [79], *Rhodospseudomonas palustris* [3,67,69], *Aspergillus nidulans* [3], *Rhodospiridium* sp. [80], *Torulaspora delbrueckii* [3], *Candida famata* [71], *Methylomonas methanica*, *Escherichia coli*, *Methylococcus capsulatus* [3].

Для увеличения выхода сквалена в геномы микроорганизмов внедряют гены, значительно усиливающие его биосинтез [3]. Так, Хи и соавторы [67] в своей работе провели исследования по блокированию гена *shc* (превращает сквален в гопаиноид) у бактерии *Rhodospseudomonas palustris* TIE-1, что привело к способности штамма бактерии накапливать сквален в больших количествах (9,9 мг/г сухого вещества). Еще одним модельным (стандартным) источником получения сквалена являются дрожжи *Saccharomyces cerevisiae* (*S. cerevisiae*). В данном штамме с помощью метаболических манипуляций геномной инженерии оптимизирован путь синтеза изопrenoида [81,82]. В научной статье [83] говорится о разработках, позволивших получить

штамм *S. cerevisiae*, продуцирующий сквален в количестве, превышающем уровень природного штамма более чем в 20 раз. В данном штамме ученые провели работы по генетическому нарушению сверхэкспрессирующего гена *tHMG1*, в результате чего нарушалась работа HMG-CoA-редуктазы 1, и, как следствие, это привело к накоплению липидов и сквалена в клетках дрожжей. Отмечено, что благодаря этим генетическим изменениям ген *DGA1*, кодирующий диацилглицерол-ацилтрансферазу, был сверхэкспрессирован для усиления биосинтеза липидов. Вместе с тем гены *POX1* и *PXA2*, кодирующие ацил-KoA оксидазу и субъединицу пероксисомального транспортера ABC, были удалены для снижения β -окисления липидов [82,83]. Кроме того, путем генетической модификации, включающей сверхэкспрессию бактериальной фарнезилдифосфатсинтазы (*ispA*) и укороченной формы гидроксиметилглутарил-KoA-редуктазы (*tHMG1*), был создан штамм *S. cerevisiae*, при культивировании которого выход сквалена составляет не менее 400 ± 45 мг/л [84]. Также отмечено, что при частичном ингибировании синтеза скваленэпоксидазы выработка целевого продукта штаммом-продуцентом увеличивается до 756 мг/л [84].

Таблица 4. Уровень производства сквалена микроорганизмами
Table 4. Level of squalene production by microorganisms

Продуцент сквалена	Количество	Литература
<i>Rhodopseudomonas palustris</i> TIE-1	9,90 мг/г сухого вещества	[71,72]
<i>Escherichia coli</i>	230,00 мг/л сквалена	[73]
<i>Saccharomyces uvarum</i>	14,30 мг/г сухого вещества	[74]
<i>Schizochytrium mangrovei</i>	0,16 мг/г сухого вещества	[75]
<i>Halobacterium cutirubrum</i>	1,00 мг/г сухого вещества	[76]
<i>Auranthiochytrium</i> sp.	900–6940 мг/л	[2]
<i>Pseudozyma</i> sp.	340,50 мг/л	[2]
<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	445,6–756 мг/л	[77,78]
<i>Schizochytrium mangrovei</i>	0,035–0,162 мг/г	[76]
<i>Schizochytrium mangrovei</i> PQ6	6,9 г/л	[77]
<i>Schizochytrium</i> sp. S31	32,03 г/л	[78]

Некоторые научные разработки включают в себя введение ферментной системы в генетическую конструкцию бактерии, в результате чего микроорганизмы получают способность синтезировать сквален. Так, например, в *E. coli* был введен ген, способный синтезировать ферменты SQS и HGMR из *S. cerevisiae*, что позволило превратить *E. coli* в полноценный продуцент сквалена [73,85–87].

Опытным путем доказано, что за счет улучшения мевалонатного пути выход сквалена может также быть увеличен [88]. Так, определено, что выработка сквалена штаммом *S. cerevisiae* значительно увеличивалась при добавлении в питательную среду этилового спирта, однако при этом отмечалось снижение выхода биомассы дрожжей [88].

Исследования показали, что частичное инактивирование CrSQE позволяет значительно увеличить выработку эндогенного сквалена *C. reinhardtii* [89]. При этом остается открытым вопрос, каким образом можно удовлетворить растущий спрос на этот уникальный биологический изопреноид с помощью экологически безопасных и продуктивных генно-модифицированных микроорганизмов-продуцентов [71].

5. Биологически активные свойства сквалена

Биомолекула сквалена в организме человека синтезируется в печени и с помощью липопротеинов низкой плотности крови транспортируется по организму, в том числе в сальные железы [90]. Как уже ранее отмечалось, сквален участвует в синтезе холестерина (Рисунок 3) [64] и обладает рядом положительных свойств. В сутки в организме человека образуется от 125 до 474 мг сквалена. Количество синтезируемого сквалена организмом человека зависит от пола, возраста и рациона питания. Учеными доказано, что после 30 лет уровень синтеза сквалена в организме человека снижается и для обеспечения нормального метаболизма необходимо потреблять экзогенный вид сквалена [9]. Следует отметить, что при поступлении сквалена с пищей уровень усвоения биомолекулы может достигать 85% [8]. Он всасывается и распространяется через кровь по всем органам и тканям [9].

Важность сохранения концентрации сквалена на физиологическом уровне обусловлена его терапевтическими и биологическими свойствами (Рисунок 4): антиоксидантными, противоопухолевыми, противовоспалительными (иммуномодулирующими), антиатеросклеротическими, гепатопротекторными, антибактериальными [8,9,87,88],

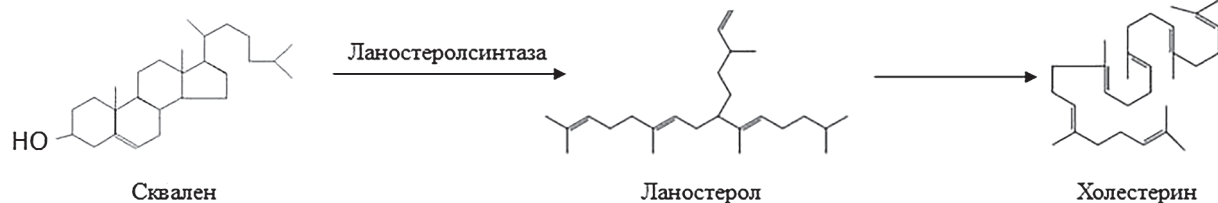


Рисунок 3. Синтез холестерина в присутствии сквалена
Figure 3. Cholesterol synthesis in the presence of squalene

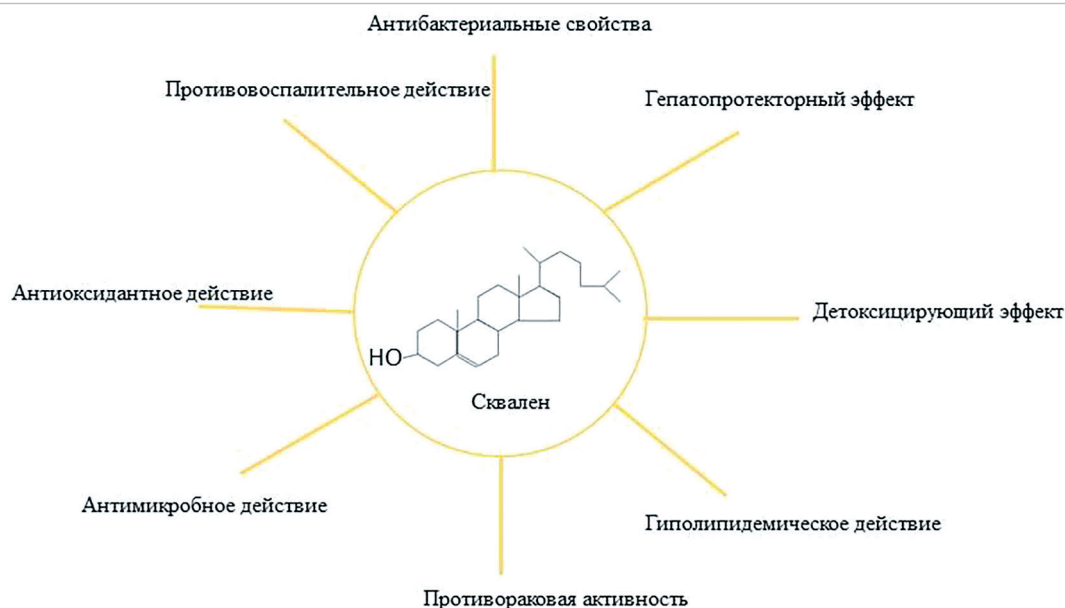


Рисунок 4. Биологически активные свойства сквалена
Figure 4. Biologically active properties of squalene

а также детоксицирующим, гиполипидемическим, увлажняющим действием [7–9].

В связи с важностью биологической активности сквалена некоторые его виды необходимо обсудить отдельно.

5.1. Антибактериальные свойства сквалена

На фоне растущей устойчивости многих микроорганизмов к антибиотикам перед научным сообществом стоит важная задача — поиск новых биомолекул, способных эффективно подавлять рост и развитие патогенных и условно-патогенных микроорганизмов, дрожжей и грибов [91]. В этой связи авторы данной рукописи попытались обобщить имеющиеся научные знания об антибактериальном и фунгицидном действии сквалена, выделенного из растительного, животного сырья и микроорганизмов. Хорошо известно, что растительное, животное сырье и микроорганизмы синтезируют большую группу веществ различной природы, обладающих широким спектром терапевтических свойств [92].

Так, российскими учеными с помощью диско-диффузионного метода было доказано, что сквален, выделенный из *Symphytum officinale*, обладает антибактериальным действием. В частности, эмульсия сквалена в концентрации от 800 до 1600 мкмоль/л подавила процесс жизнедеятельности грамотрицательной палочковидной бактерии *Escherichia coli* [93]. При изучении антимикробной активности ацетонового экстракта сквалена, выделенного из *Stichopus hermanni* на различных тест-штаммах (*Salmonella typhi*, *Bacillus subtilis*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Bacillus cereus*, *Escherichia coli*, *Proteus vulgaris*, *Klebsiella pneumoniae*, *Nocardia brasiliensis*, *Staphylococcus aureus*), выявлена незначительная антимикробная активность против *S. aureus*, *B. cereus* и патогена *C. albicans* [93]. Аналогичные результаты были получены Bindu и др. [94] и описаны в работе Cheng и др. [8]. Показано, что сквален отрицательно влияет на жизнедеятельность и развитие *S. aureus* [95,96], *Micrococcus roseus*, *Vibrio harveyi*, *Klebsiella pneumoniae*, *Escherichia coli* [97], а также ингибирует рост и развитие таких дрожжей, как *C. albicans*, *C. glabrata*, *C. haemulonii*, *C. tropicalis* [98,99].

Выявлено, что наноземлю сквалена более эффективно подавляет рост и развитие грамположительных бактерий, чем грибов и грамотрицательных бактерий [100].

Для более полного представления об антимикробной активности сквалена рассмотрены доступные данные о механизмах его действия. В ходе анализа удалось найти сведения о том, что сквален у грамположительных бактерий может ингибировать процесс биосинтеза некоторых пигментов. Такой механизм антимикробного действия был выявлен у сквалена при подавлении роста и развития *S. aureus*. Доказано, что сквален ингибирует синтез стафилоксантина, в результате чего инактивируется антиокислительная система бактерии [3,98]. В работе Fang и др. выявлено, что сквален способен повреждать клеточную мембрану бактерии, разрушать ДНК и ингибировать синтез некоторых белков [98]. Данный факт также отражен в исследованиях Shalu и др. [3].

Таким образом, можно сделать вывод о том, что сквален является уникальной биологической молекулой естественного происхождения, которая может использоваться в рецептурах функциональных продуктов питания не только в качестве функционального ингредиента, но и в качестве консерванта и самостоятельной молекулы. Несмотря на фрагментарность сведений об антимикробном эффекте сквалена в литературе, данная биомолекула имеет существенный потенциал для фундаментальных и прикладных исследований с целью разработки нового антимикробного агента на основе сквалена [3,98].

5.2. Детоксикационные свойства

Впервые детоксикационные свойства сквалена были открыты в 1982 г [99,100]. Было установлено, что для реализации указанных свойств сквалена его доза в организме должна превышать суточную норму и составлять около 11 г/сутки [100]. Однако стоит заметить, что в научной литературе имеется противоречивая информация о безопасности использования в рационе питания сквалена в повышенной дозе [100,101]. Поэтому данный вопрос требует дополнительного изучения.

В некоторых исследованиях указано, что сквален способен работать в качестве антидота против свинца, мышьяка, а также таких соединений, как стрихнин, фенотербитал, теофиллин, и циклофосфамид, гексахлорбензол (хлорорганический ксенобиотик), гексахлорбифенил [101,102]. В работе Kelly указано, что для выведения из организма человека через фекалии гексахлорбензола, стрихнина и теофиллина суточная доза сквалена должна быть больше 8% [103]. Результаты исследований *in vivo* позволили выявить, что сквален минимизирует негативное влияние метотрексата (антифолатного пре-

парата, предназначенного для лечения ревматоидного артрита, онкологических заболеваний, доброкачественных опухолей, псориаза) на печень [104], стимулирует микросомальную цитохромную P 450 оксидазную ферментативную систему печени человека [102,105]. Благодаря стимуляции этой же системы сквален выполняет защитную функцию от токсического эффекта, вызванного приемом циклофосфамида (противоракового препарата, оказывающего также эффект иммунодепрессанта) [102].

Анализ научной литературы позволил выявить, что сведения о детоксикационном эффекте сквалена и его производных фрагментированы и недостаточно подробно изучены. Также в научной литературе отсутствуют сведения, описывающие механизм детоксикационного эффекта сквалена. Известно, что данное свойство обусловлено его неполярной природой, благодаря которой биомолекула может взаимодействовать с токсичными соединениями. Недостаток данных по исследуемой функции стимулирует научный интерес к дальнейшим изысканиям. Возможно, научное сообщество докажет, что сквален представляет собой идеальный детоксикационный агент для организма человека [2].

5.3. Противовоспалительные (иммуномодулирующие) свойства сквалена

Защитной системой организма является иммунитет. Для того чтобы иммунная система эффективно защищала организм от различных инфекций, аутоиммунных заболеваний и аллергических реакций, ее необходимо поддерживать различными нутриентами — биологически активными веществами естественного происхождения [106]. Таким иммуномодулирующим действием обладают тритерпеновые соединения, в частности сквален [107]. Установлено, что сквален может останавливать различные воспалительные процессы, так как участвует в реакциях, приводящих к снижению выработки провоспалительных генов в иммунных клетках и к выработке цитокинов [72]. Однако для этого необходимы высокие концентрации данного соединения. Так, отмечено, что при концентрации 100 мкМ и 10 мкМ сквален не обладает противовоспалительным действием, а, наоборот, способствует протеканию провоспалительных реакций [108]. Исследуемая молекула (сквален) стимулирует сигналы ответа на ремоделирование и восстановление тканей вместе с рекрутинговыми молекулами нейтрофилов (Рисунок 5).

Сквален способен оказывать опосредованное влияние на процесс поляризации макрофагов при воспалительных процессах [109], он способствует интенсификации процесса синтеза противовоспалительных цитокинов в провоспалительных макрофагах; стимулирует сигналы ремоделирования и восстановления, а также сигналы рекрутинга эозинофилов и нейтрофилов, ответственных за фагоцитоз [109]. Данный факт отмечен и в других работах [108,110,111]. Сквален обладает значительным потенциалом для активации клеток (нейтрофилов, макрофагов и моноцитов), участвующих в регулировании воспалительных процессов [108,110–112]. Так, Cárdeno и соавторы в своей работе указали, что в присутствии сквалена уровень цитокинов интерферон гамма IFN- γ , интерлейкин IL-6, TNF- α и интерлейкин IL-1 β снижается [110]. К аналогичным выводам пришли Chang с соавторами, которые смогли доказать, что сквален снижает инфильтрацию воспалительных клеток и снижает уровни экспрессии TNF- α и IL-6 [111]. Аналогичные результаты получены Widyawati и др. [112], Khullar и др. [113], Rochette и др. [114]. В работах [111–114] указано, что биоактивный тритерпен значительно стимулирует процессы, направленные на синтез противовоспалительных цитокинов IL-10, IL-13 и IL-4.

В присутствии сквалена снижается выработка провоспалительной ферментной системы (индуцибельная синтаза оксида азота, циклооксигеназа-2 и миелопероксидаза) и сигнальных путей, опосредованных фактором транскрипции (NF- κ B (I κ B α)), митоген-активируемой протеинкиназой и матриксной металлопротеиназой. Кроме того, сквален повысил уровни экспрессии противовоспалительной гем-оксигеназы 1 (HO-1) и факторов транскрипции (Nrf2 и PPAR γ) [110]. На моделях *in vivo* (модели данио-рерио) определено, что сквален подавляет процессы воспаления за счет снижения миграции нейтрофилов в очагах воспаления и уменьшения экспрессии генов провоспалительных цитокинов tnfa и cox2 [115].

К аналогичным выводам пришла научная группа, изучающая этилацетатные и гексановые фракции водно-этанольного (70%v/v) экстракта *Caulerpa racemosa*. Сквален снизил уровень ключевых провоспалительных цитокинов в липополисахарид-индуцированных макрофагах [116]. Экстракт корня *A. augusta* L., обогащенный скваленом, обладает выраженным противовоспалительным эффектом, который почти приблизился к положительному контролю 4-хлорфенолята натрия [117]. В экспериментах на животных доказано, что

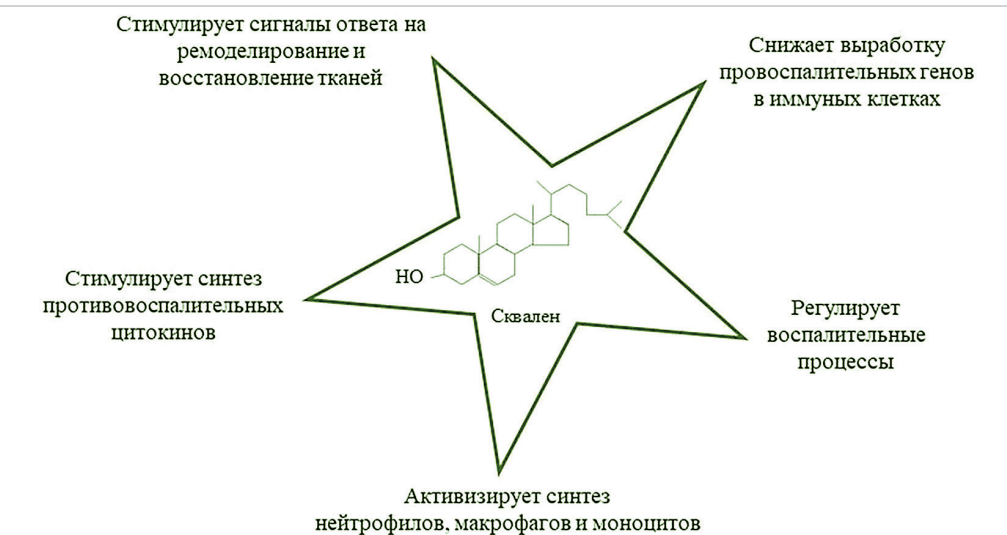


Рисунок 5. Механизм противовоспалительного (иммуномодулирующего) действия сквалена
Figure 5. Mechanism of anti-inflammatory (immunomodulatory) action of squalene

сквален, выделенный из *Simarouba glauca*, способен снимать отек и снижать уровни провоспалительных цитокинов (PGE-2, PGE-2, TNF- α , MPO, интерлейкин IL-6, циклооксигеназа-2) [118].

В настоящей работе показано, что существующие данные о противовоспалительном (иммуномодулирующем) эффекте сквалена получены лишь в отдельных *in vitro* исследованиях, тогда как клинических и доклинических испытаний сквалена, посвященных этому эффекту, в литературе недостаточно. Поэтому важно сосредоточиться на клинических испытаниях сквалена, а для этого необходимо составить правильный дизайн эксперимента [106] с целью подтверждения этого эффекта.

5.4. Антиоксидантные свойства сквалена

Отмечено, что с противовоспалительными свойствами тесно связана антиоксидантная активность сквалена [108]. Так, имеется множество работ, свидетельствующих о том, что сквален помимо интенсификации процессов синтеза противовоспалительных цитокинов в провоспалительных макрофагах [109] стимулирует защиту организма от воздействия свободных радикалов и окислительного стресса [116]. При подготовке настоящего системного обзора выявлено большое количество работ, подтверждающих антиокислительный потенциал биоактивного тритерпена [118–120]. Поэтому данное свойство мы рассмотрим не так подробно, как предыдущие терапевтические свойства, а лишь осветим некоторые исследования последних лет для полноты картины. В частности, методом *in vitro* Cheng и др. [119] показали, что экстракты из листьев Pandan, содержащие сквален ($1229,98 \pm 13,09$ мкг/г сухого вещества), проявляют выраженную антиоксидантную активность. Экстракт эффективно связывал свободные радикалы DPPH и ABTS ($12,46$ и $22,14$ мкмоль Trolox/г сухого вещества соответственно), а также восстанавливал ионы меди и железа ($14,275$ и $10,629$ мкмоль Trolox/г сухого вещества соответственно) [119]. Благодаря наличию сквалена у масла семян *Sacha inchi* (*Plukenetia luvulibilis*) выявлена антиоксидантная активность. При тестировании антиоксидантной активности в присутствии реактива DPPH антиоксидантная активность масла семян *P. volubilis* составила $3,23$ мкмоль Trolox/г масла, в присутствии реактива ABTS это значение для масла семян составило $2,10$ мкмоль Trolox/г масла [120]. Результаты исследования антиоксидантной активности эмульсии сквалена *S. officinale* методом, основанным на окислении 2,2'-азино-бис(3-этилбензотиазолин-6-сульфоновой кислоты) (ABTS), показали отсутствие выраженного антиоксидантного эффекта. Авторы предполагают, что антиоксидантный потенциал эмульсии связан со способностью биоактивной молекулы воздействовать на биомолекулы-мишени, приводящие к окислительному стрессу [93].

Zhang с соавторами на моделях *in vitro* и *in vivo* показали, что сквален связывает свободные радикалы (с помощью теста 2,2-дифенил-1-акрилгидразила (DPPH)) и снижает содержание активных форм кислорода [115].

Уровень маркера антиоксидантной активности и концентрация малонового диальдегида (МДА) были измерены у крыс с диабетом, в рацион которых входил сквален в количестве 160 мг/кг. При данной дозе сквалена снижался уровень малонового альдегида в крови

крыс с диабетом II типа, что свидетельствует о сильном антиоксидантном потенциале сквалена [120].

Научная группа, изучающая этилацетатные и гексановые фракции водно-этанольного (70% v/v) экстракта макроводоросли *Caulerpa racemosa*, доказала, что в присутствии сквалена снижается содержание активных форм кислорода, концентрация гидроксильных и алкильных радикалов также значительно уменьшается. В ходе эксперимента выявлена способность сквалена снижать уровень оксида азота (NO), содержание индуцируемой синтазы оксида азота (iNOS), уровень 2,2'-азобис(2-амидинопропан) дигидрохлорида (AAPH), концентрацию простагландина E2 (PGE2), циклооксигеназы (COX-2) [116]. Способность сквалена снижать содержание активных форм кислорода также подтверждена в работах [120,121]. Сквален, загруженный в наночастицы поли-молочно-гликолевой кислоты (PLGA), снижает уровень активных форм кислорода и повышает жизнеспособность клеток при окислительном стрессе [116]. Механизм данного явления связывания активных форм кислорода можно объяснить наличием в молекуле сквалена метильной группы, которая составляет водород для диеновой реакции через перегруппировку Дильса-Альдера. Данный механизм также может объяснить реакцию сквалена и синглетного кислорода [119].

На основании вышепредставленных сведений можно прийти к заключению, что исследуемый биоактивный тритерпен (сквален) является уникальным антиоксидантом естественного происхождения, который имеет большие перспективы для применения в пищевой промышленности, лечебной и профилактической косметике, а также при создании функциональных и специализированных продуктов питания [122].

В некоторых работах отмечено, что сквален способен продлевать срок годности и хранения растительных масел благодаря тому, что замедляет перекисное окисление непредельных жирных кислот растительных липидов [123–126].

5.5. Противоопухолевые свойства сквалена

Сквален представляет собой биологически активное вещество натурального происхождения, у которого выявлены противоопухолевый и химиопрофилактический эффекты [102,126,127]. Так, в работе Rajamani и др. [128] установлено, что сквален, полученный из экстракта бурых водорослей, способен не только оказывать воздействие на различные клеточные процессы, но и изменять сигнальный путь фактора, индуцируемого гипоксией, что, в свою очередь, позволяет предотвратить развитие опухолевой клетки. Также показано, что сквален эффективен при почечно-клеточном раке [128]. Эффективность фракции пальмового масла, обогащенной скваленом, была показана на клетках рака молочной железы. Доказано, что сквален способен подавлять экспрессию белка ядерного фактора каппа-легкой цепи-энхансера активированных В-клеток (NF- κ B) в клетках рака молочной железы, кратковременно подвергавшихся воздействию фактора некроза опухоли-альфа (TNF- α) [129]. Методами *in vitro* и *in vivo* показан дозозависимый эффект сквалена и его противоопухолевой активности [102,129,130].

В работе Yin и др. [131] установлено, что этанольный экстракт *Teucrium manghuaense*, содержащий в своем составе сквален

в количестве 28,55 %, подавляет развитие клеток рака толстой кишки человека LoVo и ингибирует рост клеточной линии L1210 (клетки мышинного лейкоза). Abuobeid и др. [132] и Smith [133] также отметили значительный противоопухолевый потенциал исследуемого биоактивного тритерпена (скалена). С помощью тестов *in vivo* был предположен механизм противоопухолевой активности скалена [134]. Newmark [134] предположил, что противоопухолевая активность скалена может быть связана с ингибированием фермента HMG-COA-редуктазы, в результате чего снижается доступность фarnезилпиррофосфата (FPP) для пренилирования онкогена *ras*, необходимого для его перемещения в клеточные мембраны и выполнения функции передачи сигнала *ras*. Автор предположил, что данный механизм применим к онкозаболеваниям, тесно связанным с онкогенами *ras* (рак поджелудочной железы, молочной железы и толстой кишки) [134].

Представленная информация свидетельствует о том, что изучение противоопухолевого потенциала скалена находится на зачаточном уровне, так как в открытых источниках очень мало информации, подтверждающей исследуемый эффект скалена. Тем не менее по доступным данным можно сделать вывод о необходимости расширять научные изыскания механизма действия скалена на различные опухолевые клетки методами *in vitro* и *in vivo*. Не было найдено ни одной научной работы, свидетельствующей о доклинических и клинических испытаниях противоопухолевого потенциала скалена. В этой связи также очень важно проводить клинические исследования для проверки роли этого питательного вещества в схемах терапии рака [106].

6. Скален как ингредиент функциональных продуктов питания

Описанные выше терапевтические свойства биологически активного терпенового соединения натурального происхождения свидетельствуют о том, что скален является потенциальным ингредиентом для создания на его основе функциональных и/или специализированных продуктов питания, направленных на коррекцию или профилактику различных заболеваний, связанных с воспалительными, окислительными процессами [129,135,136]. Необходимость разработки функциональных продуктов питания со скаленом обусловлена тем, что человек с возрастом теряет способность к синтезу скалена [8,9]. Следовательно, его дефицит необходимо удовлетворять за счет потребления продуктов питания, обогащенных скаленом. Не стоит забывать, что всего 65–80 % скалена усваивается при оральном потреблении [8,9].

Согласно анализу современной научной и технической литературы, разработанных продуктов, содержащих скален, крайне мало [136–139] (Рисунок 6).

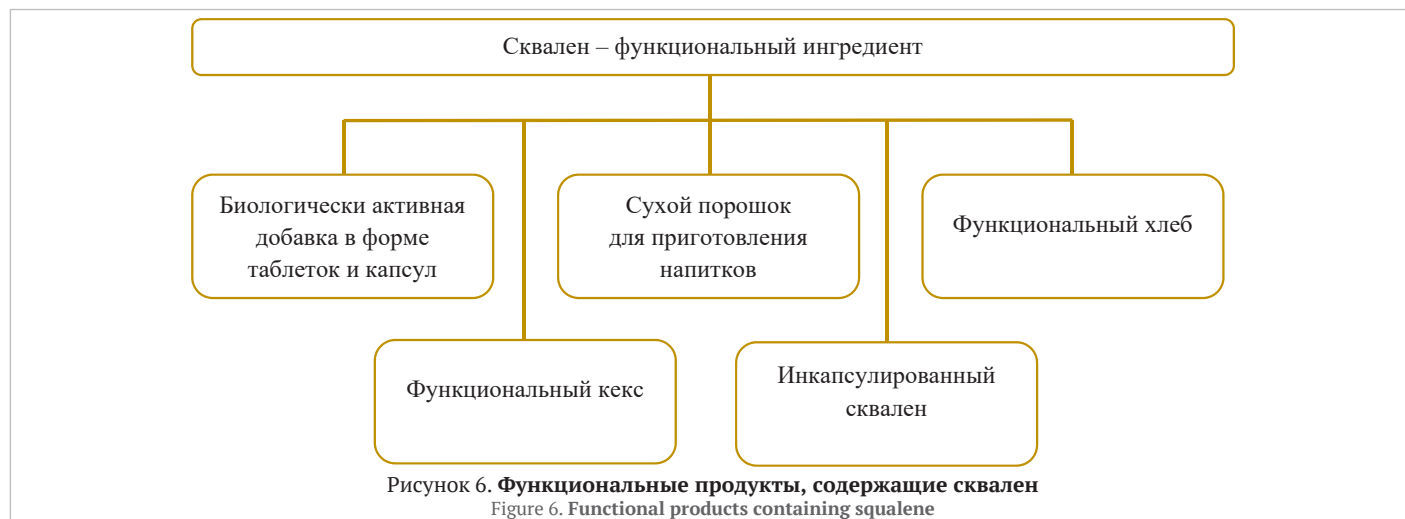
Так, Sponton и др. [137] разработан инкапсулированный скален. При этом для инкапсуляции порошкообразного скалена, выделенного из кукурузного масла, Sponton с соавторами использовали наночастицы яичного белка [137]. Условия эксперимента включали масляную фракцию (0,1–0,2), содержание белка (2–5 мас.%), давление гомогенизации (100 и 200 бар) и количество мальтодекстрина (10–20 мас.%). При масляной фракции 0,15, содержании белка 5 мас. %, давлении гомогенизации 200 бар и 20 % мальтодекстрина, была достигнута самая высокая эффективность инкапсуляции. Инкапсулированный продукт представляет собой порошок, который

характеризуется высокими эмульгирующими свойствами. Авторы разработки отмечают, что эмульгирующая способность инкапсулированного скалена значительно выше эмульгирующей способности нативного яичного белка [137]. Исследователи предлагают использовать инкапсулированный скален в производстве функционального хлеба. В своих исследованиях авторы показали, что добавление скалена в рецептуру хлеба не изменяет физико-химические показатели его качества, а также не оказывает отрицательного влияния на органолептические и текстурные (реологические) свойства готового продукта. При этом отмечено, что неинкапсулированный скален распадается в процессе термической обработки готового продукта, чего не наблюдается при применении инкапсулированного скалена [137].

На основе инкапсулированного скалена также разработаны кексы. Изучение физико-химических, реологических, текстурных и сенсорных показателей качества кексов позволило выявить, что добавление в рецептуру кексов инкапсулированного скалена позволяет значительно повысить их значения. В частности, ученый отмечает, что новые кексы отличаются улучшенной структурной организацией — они менее жесткие и липкие при жевании, более упругие и цельные, менее крошащиеся — а также более длительным сроком хранения благодаря наличию антимикробных и антиоксидантных свойств. В силу того, что за счет добавления скалена в рецептуру снижается содержание других высококалорийных соединений, полученные кексы характеризовались пониженной калорийностью (калорийность приготовленных кексов варьировалась от $480,78 \pm 0,10$ до $501,61 \pm 0,38$ ккал). Также автором исследования отмечено, что скален помогает повысить выход готового продукта, так как он способствует сохранению влаги в мякоти готового продукта [138]. Следовательно, разработанная система инкапсуляции была пригодна для получения функционального хлеба и кексов на основе обогащения скаленом.

Результаты научного исследования Вагр и соавторов [139] свидетельствуют о том, что скален, благодаря своим биологическим свойствам, можно использовать также в качестве самостоятельной биологически активной добавки, пищевой добавки, имеющей препаративную форму в виде таблетки или желатиновой капсулы. Такой товарный вид скалена обеспечивает точную дозировку и удобство при приеме. Определено, что при применении пищевой добавки, в состав которой входит природный скален в количестве 2 %, наблюдается увеличение выработки дыхательных маркерных ферментов (НАДН-дегидрогеназа и цитохром-с-оксидаза), замедление реакций перекисного окисления липидов в митохондриях и образования малонового диальдегида; повышается синтез ферментов, участвующих в цикле трикарбоновых кислот (малатдегидрогеназа, α -кетоглутаратдегидрогеназа, изоцитратдегидрогеназа, сукцинатдегидрогеназа); повышается выработка аденозинтрифосфата (АТФ) митохондриями. Таким образом, пищевая (биологически активная) добавка скалена повышает окислительную защитную систему митохондрий за счет инициации процессов синтеза и активности антиперекисной ферментной системы, состоящей из каталазы и супероксиддисумутазы, а также из глутатионзависимых антиоксидантных ферментов (глутатионпероксидазы и глутатион-S-трансферазы) [140].

Определено, что при пероральном приеме скалена инициируется процесс синтеза холестерина. Так, клинические исследования показали, что при пероральном приеме добавки скалена в дозе 500 мг



синтез холестерина у людей увеличивался в течение 9–24 ч. Кроме того, сквален способствовал увеличению концентрации ланостерола в крови человека. Также некоторыми авторами отмечено, что сквален широко используется в терапевтических целях в виде вакцины [139,140], в виде порошка, предназначенного для добавления в различные оздоровительные напитки, соки и смузи [137,139,140].

Таким образом, результаты исследований, указанных в работах [138–141], подтверждают тот факт, что нативный и инкапсулированный сквален является отличным функциональным ингредиентом для создания инновационных продуктов профилактического действия, обладающих антиоксидантными и антимикробными свойствами, с высоким терапевтическим потенциалом. Однако работы, посвященные разработке функциональных продуктов питания на основе сквалена, крайне мало, а имеющиеся разработанные продукты питания не найдут широкого применения в рационе людей, соблюдающих принципы здорового образа жизни, так как содержат простые сахара. Поэтому научному сообществу необходимо разработать стратегию расширения ассортимента продуктов питания, в рецептуру которых будет входить незаменимый для жизнедеятельности человека сквален. Как было отмечено ранее, сквален является предшественником холестерина, который является базисом для синтеза многих гормонов человека [4]. Недостаток сквалена в организме может привести к серьезным гормональным нарушениям.

7. Выводы

В настоящем литературном обзоре систематизированы литературные научные данные о липофильном полиненасыщенном триперене — сквалене природного происхождения. Установлено, что вследствие высокой степени ненасыщенности сквален чувствителен к окислению молекулярным кислородом, поэтому может использоваться в качестве природного антиоксиданта, однако данный процесс еще недостаточно изучен и требует большего внимания. Кроме того, определено, что благодаря своей липофильной природе сквален обладает эмульгирующей способностью, что позволяет исполь-

зовать его в рецептурах стабильных и нетоксичных наноэмульсий и липосом, предназначенных для адресной доставки питательных веществ в организме.

Выявлено, что сквален можно получать из сырья животного, растительного и микробиологического происхождения. Сырье растительного и животного происхождения (кроме печени акулы) содержит малое количество целевого продукта. Тем не менее определено, что в оливковом масле сквален не распадается в процессе кулинарной обработки, что делает его лучшим растительным источником сквалена. Природные микроорганизмы не способны вырабатывать сквален в больших количествах, поэтому исследователи предложили новые методы и подходы для увеличения выхода сквалена микроорганизмами, в частности путем изменения их генетической конструкции. Данный подход характеризуется стабильностью продуктивности и является экологически безопасным. В качестве основных микробиологических продуцентов сквалена выделяют *R. palustris*, *E. coli*, *S. uvarum*, *S. mangrovei*, *H. cutirubrum*, *Aurantiochytrium* sp., *Pseudozyma* sp., *S. cerevisiae*, *Schizochytrium mangrovei*, *S. mangrovei* PQ6, *Schizochytrium* sp. S31.

Установлено, что природный сквален обладает терапевтическими и биологическими свойствами (антиоксидантными, противоопухолевыми, противовоспалительными (иммуномодулирующими), антиатеросклеротическими, гепатопротекторными, антибактериальными, а также детоксицирующим, гиполипидемическим, увлажняющим действием). В настоящей статье подчеркивается, что способность организма синтезировать сквален в физиологической норме с возрастом снижается, поэтому его необходимо потреблять с пищей. В связи с этим научному сообществу необходимо разработать стратегию расширения ассортимента продуктов питания, в рецептуру которых будет входить незаменимый для жизнедеятельности человека сквален. Как отмечалось ранее, сквален является предшественником холестерина, который служит базисом для синтеза многих гормонов. Недостаток сквалена в организме может приводить к серьезным гормональным нарушениям.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / REFERENCES

- Spanova, M., Daum, G. (2011). Squalene — biochemistry, molecular biology, process biotechnology, and applications. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 115(11), 1299–1320. <https://doi.org/10.1002/ejlt.201100203>
- Lozano-Grande, M. A., Gorinstein, S., Espitia-Rangel, E., Dávila-Ortiz, G., Martínez-Ayala, A. L. (2018). Plant sources, extraction methods, and uses of squalene. *International Journal of Agronomy*, 2018(1), Article 1829160. <https://doi.org/10.1155/2018/1829160>
- Shalu, S., Karthikanath, P. K. R., Vaidyanathan, V. K., Blank, L. M., Germer, A., Balakumaran, P. A. (2024). Microbial squalene: A sustainable alternative for the cosmetics and pharmaceutical industry — A review. *Engineering in Life Sciences*, 24(10), Article e202400003. <https://doi.org/10.1002/elsc.202400003>
- Popa, O., Băbeanu, N. E., Popa, I., Niță, S., Dinu-Părvu, C. E. (2015). Methods for obtaining and determination of squalene from natural sources. *BioMed Research International*, 2015(1), Article 367202. <https://doi.org/10.1155/2015/367202>
- Yarkent, Ç., Oncel, S. S. (2022). Recent progress in microalgal squalene production and its cosmetic application. *Biotechnology and Bioengineering*, 27(3), 295–305. <https://doi.org/10.1007/s12257-021-0355-z>
- Kim, S. K., Karadeniz, F. (2012). Biological importance and applications of squalene and squalane. *Advances in Food and Nutrition Research*, 65, 223–233. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-416003-3.00014-7>
- Naziri, E., Tsimidou, M. Z. (2013). Formulated squalene for food related applications. *Recent Patents on Food, Nutrition and Agriculture*, 5(2), 83–104. <https://doi.org/10.2174/1876142911305020001>
- Cheng, L., Ji, T., Zhang, M., Fang, B. (2024). Recent advances in squalene: Biological activities, sources, extraction, and delivery systems. *Trends in Food Science and Technology*, 146, Article 104392. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2024.104392>
- Gohil, N., Bhattacharjee, G., Khambhati, K., Braddick, D., Singh, V. (2019). Engineering strategies in microorganisms for the enhanced production of squalene: Advances, challenges and opportunities. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 7, Article 50. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2019.00050>
- Kumar, L. R. G., Tejpal, C. S., Anas, K. K., Chatterjee, N. S., Anandan, R., Mathew, S. et al. (2023). Squalene: Bioactivity, extraction, encapsulation, and future perspectives. Chapter in a book: *Marine Antioxidants*. Academic Press, 2023. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-95086-2.00038-2>
- Xu, W., Ma X., Wang, Y. (2016). Production of squalene by microbes: An update. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 32(12), Article 195. <https://doi.org/10.1007/s11274-016-2155-8>
- Lyon, C. K., Becker, R. (1987). Extraction and refining of oil from amaranth seed. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 64, 233–236. <https://doi.org/10.1007/bf02542008>
- Paramasivan, K., Mutturi, S. (2022). Recent advances in the microbial production of squalene. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 38(5), Article 91. <https://doi.org/10.1007/s11274-022-03273-w>
- Bhattacharjee, P., Shukla, V. B., Singhal, R. S., Kulkarni, P. R. (2001). Studies on fermentative production of squalene. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 17, 811–816. <https://doi.org/10.1023/A:1013573912952>
- Wei, L.-J., Kwak, S., Liu, J.-J., Lane, S., Hua, Q., Kweon, D.-H. et al. (2018). Improved squalene production through increasing lipid contents in *Saccharomyces cerevisiae*. *Biotechnology and Bioengineering*, 115(7), 1793–1800. <https://doi.org/10.1002/bit.26595>
- Ibrahim, H., Ali, A. (2023). Facile synthetic method of squalene from vegetable residue. *Journal of Chemical Engineering and Industrial Biotechnology*, 9(1), 8–12. <https://doi.org/10.15282/jceib.v9i1.9569>
- Langdon, R. G., Bloch, K. (1953). The biosynthesis of squalene. *Journal of Biological Chemistry*, 200(1), 129–134. [https://doi.org/10.1016/S0021-9258\(18\)38445-X](https://doi.org/10.1016/S0021-9258(18)38445-X)
- Liu, G. C. K., Ahrens, E. H. Jr, Schreiber, P. H., Crouse, J. R. (1976). Measurement of squalene in human tissues and plasma: Validation and application. *Journal of Lipid Research*, 17(1), 38–45. [https://doi.org/10.1016/S0022-2275\(20\)37014-0](https://doi.org/10.1016/S0022-2275(20)37014-0)
- Micera, M., Botto, A., Geddo, F., Antonietti, S., Berte, C. M., Levi, R. et al. (2020). Squalene: More than a step toward sterols. *Antioxidants*, 9(8), Article 688. <https://doi.org/10.3390/antiox9080688>
- Aguilera, Y., Dorado, M. E., Prada, F. A., Martínez, J. J., Quesada, A., Ruiz-Gutiérrez, V. (2005). The protective role of squalene in alcohol damage in the chick embryo retina. *Experimental Eye Research*, 80(4), 535–543. <https://doi.org/10.1016/j.exer.2004.11.003>
- Pham, D. M., Boussouira, B., Moyal, D., Nguyen, Q. L. (2015). Oxidization of squalene, a human skin lipid: A new and reliable marker of environmental pollution studies. *International Journal of Cosmetic Science*, 37(4), 357–365. <https://doi.org/10.1111/ics.12208>
- Xu, L., Porter, N. A. (2015). Free radical oxidation of cholesterol and its precursors: Implications in cholesterol biosynthesis disorders. *Free Radical Research*, 49(7), 835–849. <https://doi.org/10.3109/10715762.2014.985219>
- Brunner, G., Saure, C., Buss, D. (2009). Phase equilibrium of hydrogen, carbon dioxide, squalene, and squalane. *Journal of Chemical and Engineering Data*, 54(5), 1598–1609. <https://doi.org/10.1021/jc800926z>
- Psomiadou, E., Tsimidou, M. (1999). On the role of squalene in olive oil stability. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 47(10), 4025–4032. <https://doi.org/10.1021/jf990173b>
- Wołosik, K., Knaś, M., Zalewska, A., Niczyporuk, M., Przysupka, A. W. (2013). The importance and perspective of plant-based squalene in cosmetology. *Journal of Cosmetic Science*, 64(1), 59–65.
- Lopez, S., Bermudez, B., Montserrat-de la Paz, S. (2014). Membrane composition and dynamics: A target of bioactive virgin olive oil constituents. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) — Biomembranes*, 1858(6), 1638–1656. <https://doi.org/10.1016/j.bbamem.2014.01.007>
- Fox, C. B. (2009). Squalene emulsions for parenteral vaccine and drug delivery. *Molecules*, 14(9), 3286–3312. <https://doi.org/10.3390/molecules14093286>
- Martinez-Correa, H. A., Gomes, D. C. A., Kanehisa, S. L., Cabral, F. A. (2010). Measurements and thermodynamic modeling of the solubility of squalene in supercritical carbon dioxide. *Journal of Food Engineering*, 96(1), 43–50. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2009.06.041>

29. Yao, Y., Zheng, Y., Dai, H., Jia, Y., Li, C. (2024). Kinetics of squalene quenching singlet oxygen and the thermal degradation products identification. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 72(28), 15755–15764. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.4c03329>
30. Tetko, I. V., Gasteiger, J., Todeschini, R., Mauri, A., Livingstone, D., Ertl, P. et al. (2005). Virtual computational chemistry laboratory – design and description. *Journal of Computer-Aided Molecular Design*, 19, 453–463. <https://doi.org/10.1007/s10822-005-8694-y>
31. Catchpole, O. J., Von Kamp, J.-C., Grey, J. B. (1997). Phase equilibrium for the extraction of squalene from shark liver oil using supercritical carbon dioxide. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 36(10), 4318–4324. <https://doi.org/10.1021/ie9702237>
32. Rosales-Garcia, T., Rosete-Barreto, J. M., Pimentel-Rodas, A., Davila-Ortiz, G., Galicia-Luna, L. A. (2018). Solubility of squalene and fatty acids in carbon dioxide at supercritical conditions: Binary and ternary systems. *Journal of Chemical and Engineering Data*, 63(1), 69–76. <https://doi.org/10.1021/acs.jced.7b00620>
33. Ruivo, R. M., Paiva, A., Simões, P. C. (2004). Phase equilibria of the ternary system methyl oleate/squalene/carbon dioxide. *The Journal of Supercritical Fluids*, 29(1–2), 77–85. [https://doi.org/10.1016/S0896-8446\(03\)00069-X](https://doi.org/10.1016/S0896-8446(03)00069-X)
34. Catchpole, O. J., Proells, K. (2001). Solubility of squalene, oleic acid, soya oil, and deepsea shark liver oil in subcritical R134a from 303 to 353 K. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 40(3), 965–972. <https://doi.org/10.1021/ie000590>
35. Al-Darmaki, N., Lu, T., Al-Duri, B., Harris, J. B., Favre, T. L. F., Bhagga, K. et al. (2011). Solubility measurements and analysis of binary, ternary and quaternary systems of palm olein, squalene and oleic acid in supercritical carbon dioxide. *Separation and Purification Technology*, 83, 189–195. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2011.09.043>
36. Whittenton, J., Harendra, S., Pitchumani, R., Mohanty, K., Vipulanandan, C., Thevananther, S. (2008). Evaluation of asymmetric liposomal nanoparticles for delivery of polynucleotides. *Langmuir*, 24(16), 8533–8540. <https://doi.org/10.1021/la801133j>
37. Allison, A. C. (1999). Squalene and squalene emulsions as adjuvants. *Methods*, 19(1), 87–93. <https://doi.org/10.1006/meth.1999.0832>
38. Reddy, L. H., Couvreur, P. (2009). Squalene: A natural triterpene for use in disease management and therapy. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 61(15), 1412–1426. <https://doi.org/10.1016/j.addr.2009.09.005>
39. Eilam, Y., Pintel, N., Khattib, H., Shagug, N., Taha, R., Avni, D. (2022). Regulation of cholesterol metabolism by phytochemicals derived from algae and edible mushrooms in non-alcoholic fatty liver disease. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(22), Article 13667. <https://doi.org/10.3390/ijms232213667>
40. Moore, K. J., Rayner, K. J., Suárez, Y., Fernández-Hernando, C. (2010). Micro-RNAs and cholesterol metabolism. *Trends in Endocrinology and Metabolism*, 21, 699–706. <https://doi.org/10.1016/j.tem.2010.08.008>
41. Ali, A. M. M., Bavisetty, S. C. B., Prodpran, T., Benjakul, S. (2019). Squalene from fish livers extracted by ultrasound-assisted direct in situ saponification: Purification and molecular characteristics. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 96(9), 1059–1071. <https://doi.org/10.1002/aocs.12262>
42. Ali, A. M. M., Prodpran, T., Benjakul, S. (2019). Effect of squalene rich fraction from shark liver on mechanical, barrier and thermal properties of fish (*Probarbus jullieni*) skin gelatin film. *Food Hydrocolloids*, 96, 123–133. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.05.019>
43. López-Puebla, S., Arias-Santé, M. F., Romero, J., de Camargo, A. C., Rincón-Cervera, M. A. (2025). Analysis of fatty acid profile, α -tocopherol, squalene and cholesterol content in edible parts and by-products of south pacific wild fishes. *Marine Drugs*, 23(3), Article 104. <https://doi.org/10.3390/md23030104>
44. Orban, E., Di Lena, G., Navigato, T., Masci, M., Casini, I., Caproni, R. (2011). Proximate, unsaponifiable lipid and fatty acid composition of bogue (*Boops boops*) and horse mackerel (*Trachurus trachurus*) from the Italian trawl fishery. *Journal of Food Composition and Analysis*, 24(8), 1110–1116. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2011.03.009>
45. Purkiewicz, A., Czaplicki, S., Pietrzak-Fiećko, R. (2022). The occurrence of squalene in human milk and infant formula. *Health International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(19), Article 12928. <https://doi.org/10.3390/ijerph191912928>
46. Piesiewicz, H. (2024). Squalene – an extremely valuable organic compound for health and beauty. *AURA*, 50(8), Article 149940. <https://doi.org/10.15199/2.2024.8.1> (In Polish)
47. Goudjil, H., Torrado, S., Fontecha, J., Martínez-Castro, I., Fraga, M. J., Juárez, M. (2003). Composition of cholesterol and its precursors in ovine milk. *Le Lait*, 83(2), 153–160. <https://doi.org/10.1051/lait:2003005>
48. Kallio, M. J., Siimes, M. A., Perheentupa, J., Salmenperä, L., Miettinen, T. A. (1989). Cholesterol and its precursors in human milk during prolonged exclusive breast-feeding. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 50(4), 782–785. <https://doi.org/10.1093/ajcn/50.4.782>
49. Ушакова, Т. М., Эллер, Л. И., Медведев, Ф. А., Аксюк, И. Н. (1979). Углеводы куриного яичного желтка. *Вопросы питания*, 3, 69–74. [Ushakova, T. M., Eller, K. I., Medvedev, F. A., Aksyuk, I. N. (1979). Carbohydrates of the chicken egg yolk. *Problems of Nutrition*, 3, 69–74. (In Russian)]
50. Deprez, P. P., Volkman, J. K., Davenport, S. R. (1990). Squalene content and neutral lipid composition of livers from Deep-sea sharks caught in Tasmanian waters. *Marine and Freshwater Research*, 41(3), 375–387. <https://doi.org/10.1071/MF9900375>
51. Bakes, M. J., Nichols, P. D. (1995). Lipid, fatty acid and squalene composition of liver oil from six species of deep-sea sharks collected in southern Australian waters. *Comparative Biochemistry and Physiology Part B: Biochemistry and Molecular Biology*, 110(1), 267–275. [https://doi.org/10.1016/0305-0491\(94\)00083-7](https://doi.org/10.1016/0305-0491(94)00083-7)
52. Wetherbee, B. M., Nichols, P. D. (2000). Lipid composition of the liver oil of deep-sea sharks from the Chatham Rise, New Zealand. *Comparative Biochemistry and Physiology Part B: Biochemistry and Molecular Biology*, 125(4), 511–521. [https://doi.org/10.1016/S0305-0491\(00\)00154-1](https://doi.org/10.1016/S0305-0491(00)00154-1)
53. Lozano-Grande, M. A., Gorinstein, S., Espitia-Rangel, E., Dávila-Ortiz, G., Martínez-Ayala, A. L. (2018). Plant sources, extraction methods, and uses of squalene. *International Journal of Agronomy*, 2018(1), Article 1829160. <https://doi.org/10.1155/2018/1829160>
54. Turchini, G. M., Ng, W. K., Tocher, D. R. (2011). Fish Oil Replacement and Alternative Lipid Sources in Aquaculture Feeds. CRC Press, Boca Raton, FL, USA, 2011.
55. Lyashenko, S., Chlehel-Chelh, T., Rincón-Cervera, M. A., Lyashenko, S. P., Ishenko, Z., Denisenko, O. et al. (2023). Screening of lesser-known salted-dried fish species for fatty acids, tocopherols, and squalene. *Foods*, 12(5), Article 1083. <https://doi.org/10.3390/foods12051083>
56. Khorsandmanesh, S., Gharachorloo, M., Bahmaie, M., Azizinezhad, R. (2020). Sterol and squalene as indicators of adulteration of milk fat with palm oil and its fractions. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 22(5), 1257–1266.
57. Indyk, H. E. (1990). Simultaneous liquid chromatographic determination of cholesterol, phytosterols and tocopherols in foods. *Analyst*, 115(12), 1525–1530. <https://doi.org/10.1039/an9901501525>
58. Cerebali, J., Flanagan, V. P., Farrell, H. M. (1985). Composition of the hydrocarbon fraction of goats' milk. *Journal of Lipid Research*, 26(12), 1438–1443. [https://doi.org/10.1016/S0022-2275\(20\)34249-8](https://doi.org/10.1016/S0022-2275(20)34249-8)
59. Wu, L., Zhao, J., Wu, L., Zhang, Y., Li, J. (2022). Simultaneous determination of squalene, tocopherols and phytosterols in edible vegetable oil by SPE combined with saponification and GC-MS. *LWT*, 169, Article 114026. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.114026>
60. Pacetti, D., Scortichini, S., Boarelli, M. C., Fiorini, D. (2019). Simple and rapid method to analyse squalene in olive oils and extra virgin olive oils. *Food Control*, 102, 240–244. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2019.03.005>
61. Yuan, C., Xie, Y., Jin, R., Ren, L., Zhou, L., Zhu, M. et al. (2017). Simultaneous analysis of tocopherols, phytosterols, and squalene in vegetable oils by high-performance liquid chromatography. *Food Analytical Methods*, 10, 3716–3722. <https://doi.org/10.1007/s12161-017-0927-x>
62. Park, S. Y., Choi, S. J., Park, H. J., Ma, S. Y., Moon, Y. I., Park, S.-K. et al. (2020). Hexane extract of green tea (*Camellia sinensis*) leaves is an exceptionally rich source of squalene. *Food Science and Biotechnology*, 29, 769–775. <https://doi.org/10.1007/s10068-019-00724-3>
63. Ryan, E., Galvin, K., O'Connor, T. P., Maguire, A. R., O'Brien, N. M. (2007). Phytosterol, squalene, tocopherol content and fatty acid profile of selected seeds, grains, and legumes. *Plant Foods for Human Nutrition*, 62, 85–91. <https://doi.org/10.1007/s11130-007-0046-8>
64. Popa, O., Băbeanu, N. E., Popa, I., Niță, S., Dinu-Părvu, C. E. (2015). Methods for obtaining and determination of squalene from natural sources. *Biomed Research International*, 2015(1), Article 367202. <https://doi.org/10.1155/2015/367202>
65. Nergiz, C., Çelikkale, D. (2011). The effect of consecutive steps of refining on squalene content of vegetable oils. *Journal of Food Science and Technology*, 48, 382–385. <https://doi.org/10.1007/s13197-010-0190-2>
66. Kalogeropoulos, N., Andrikopoulos, N. K. (2004). Squalene in oils and fats from domestic and commercial fryings of potatoes. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 55(2), 125–129. <https://doi.org/10.1080/09637480410001666531>
67. Xu, W., Ma, X., Wang, Y. (2016). Production of squalene by microbes: An update. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 32, Article 195. <https://doi.org/10.1007/s11274-016-2155-8>
68. Spanova, M., Daum, G. (2011). Squalene – biochemistry, molecular biology, process biotechnology, and applications. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 113(11), 1299–1320. <https://doi.org/10.1002/ejlt.201100203>
69. Craciun, B. F., Vasiliu, T., Marangoci, N., Pinteala, M. (2018). Pegylated squalene: A biocompatible polymer as precursor for drug delivery. *Revue Roumaine de Chimie*, 63(7–8), 621–628.
70. Patel, A., Bettiga, M., Rova, U., Christakopoulos, P., Matsakas, L. (2022). Microbial genetic engineering approach to replace shark livering for squalene. *Trends in Biotechnology*, 40(10), 1261–1273. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2022.03.008>
71. Manfrão-Netto, J. H. C., Queiroz, E. B., de Oliveira Junqueira, A. C., Gomes, A. M. V., de Moraes, D. G., Paes, H. C. et al. (2022). Genetic strategies for improving hyaluronic acid production in recombinant bacterial culture. *Journal of Applied Microbiology*, 132(2), 822–840. <https://doi.org/10.1111/jam.15242>
72. Xu, W., Chai, C., Shao, L., Yao, J., Wang, Y. (2016). Metabolic engineering of *Rhodospirillum rubrum* for squalene production. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, 43(5), 719–725. <https://doi.org/10.1007/s10295-016-1745-7>
73. Mendes, A., Azevedo-Silva, J., Fernandes, J. C. (2022). From sharks to yeasts: Squalene in the development of vaccine adjuvants. *Pharmaceuticals*, 15(3), Article 265. <https://doi.org/10.3390/ph15030265>
74. Blagović, B., Rupčić, J., Mesarić, M., Georgi, K., Marić, V. (2001). Lipid composition of brewer's yeast. *Food Technology and Biotechnology*, 39(3), 175–181.
75. Li, Q., Chen, G.-Q., Fan, K.-W., Lu, F.-P., Aki, T., Jiang, Y. (2009). Screening and characterization of squalene-producing thraustochytrids from hong kong mangroves. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 57(10), 4267–4272. <https://doi.org/10.1021/jf9003972>
76. Chang, M.-H., Kim, H.-J., Jahng, K.-Y., Hong, S.-C. (2008). The isolation and characterization of *Pseudomonas* sp. JCC207, a novel producer of squalene. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 78, 963–972. <https://doi.org/10.1007/s00253-008-1395-4>
77. Han, J. Y., Seo, S. H., Song, J. M., Lee, H., Choi, E.-S. (2018). High-level recombinant production of squalene using selected *Saccharomyces cerevisiae* strains. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, 45(4), 239–251. <https://doi.org/10.1007/s10295-018-2018-4>
78. Jiang, Y., Fan, K.-W., Wong, R. T.-Y., Chen, F. (2004). Fatty acid composition and squalene content of the marine microalga *Schizochytrium mangrovei*. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 52(5), 1196–1200. <https://doi.org/10.1021/jf035004c>
79. Ha, N. C., Hien, H. T. M., Thom, L. T., Quynh, H. T. H., Hong, D. D. (2017). Optimization of fermentation conditions for squalene production by heterotrophic marine microalgae *Schizochytrium mangrovei* PQ6. *Academia Journal of Biology*, 39(3), 349–358. <https://doi.org/10.15625/0866-7160/v39n3.9130>
80. Schütte, L., Hanisch, P. G., Scheler, N., Haböck, K. C., Huber, R., Ersoy, F., Berger, R. G. (2024). Squalene production under oxygen limitation by *Schizochytrium* sp. S31 in different cultivation systems. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 108(1), Article 201. <https://doi.org/10.1007/s00253-024-13051-3>

81. Shakeri, S., Khoshbasirat, F., Maleki, M. (2021). *Rhodosporidium* sp. DR37: A novel strain for production of squalene in optimized cultivation conditions. *Biotechnology for Biofuels and Bioproducts*, 14(1), Article 95. <https://doi.org/10.1186/s13068-021-01947-5>
82. Paramasivan, K., Aneesh, A., Gupta, N., Mutturi, S. (2021). Adaptive evolution of engineered yeast for squalene production improvement and its genome-wide analysis. *Yeast*, 38(7), 424–437. <https://doi.org/10.1002/yea.3559>
83. Furubayashi, M., Li L., Katabami, A., Saito, K., Umeno, D. (2014). Construction of carotenoid biosynthetic pathways using squalene synthase. *FEBS Letters*, 588(3), 436–442. <https://doi.org/10.1016/j.febslet.2013.12.003>
84. Espinosa, M. I., Williams, T. C., Pretorius, I. S., Paulsen, I. T. (2019). Benchmarking two *Saccharomyces Cerevisiae* laboratory strains for growth and transcriptional response to methanol. *Synthetic and Systems Biotechnology*, 4(4), 180–188. <https://doi.org/10.1016/j.synbio.2019.10.001>
85. Thapa, H., Naik, M., Okada, S., Takada, K., Molnár, I., Xu, I. et al. (2016). A squalene synthase-like enzyme initiates production of tetraterpenoid hydrocarbons in *Botryococcus braunii* Race L. *Nature Communications*, 7, Article 11198. <https://doi.org/10.1038/ncomms11198>
86. Zhang, Y., Wang, W., Wei, W., Xia, L., Gao, S., Zeng, W. et al. (2023). Regulation of ethanol assimilation for efficient accumulation of squalene in *Saccharomyces cerevisiae*. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 71(16), 6389–6397. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.3c00515>
87. Kajikawa, M., Kinohira, S., Ando, A., Shimoyama, M., Kato, M., Fukuzawa, H. (2015). Accumulation of squalene in a microalga *Chlamydomonas reinhardtii* by genetic modification of squalene synthase and squalene epoxidase genes. *PLoS One*, 10(3), Article e0120446. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0120446>
88. Reddy, L. H., Couvreur, P. (2009). Squalene: A natural triterpene for use in disease management and therapy. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 61(15), 1412–1426. <https://doi.org/10.1016/j.addr.2009.09.005>
89. Lou-Bonafante, J. M., Martínez-Beamonte, R., Sanclemente, T., Surra, J. C., Herrera-Marcos, L. V., Sanchez-Marco, J. et al. (2018). Current insights into the biological action of squalene. *Molecular Nutrition and Food Research*, 62(15), Article 1800136. <https://doi.org/10.1002/mnfr.201800136>
90. Sumi, E. S., Dara, P. K., Mannuthy, R. J., Ganesan, B., Anandan, R., Mathew, S. (2020). Antioxidant and hepatoprotective property of squalene for counteracting the oxidative damage induced by methotrexate in experimental rats. *Acta Biologica Szegediensis*, 64(2), 199–206. <https://doi.org/10.14232/abs.2020.2.199-206>
91. Swamy, M. K., Arumugam, G., Kaur, R., Ghasemzadeh, A., Yusoff, M. M., Sinniah, U. R. (2017). GC-MS based metabolite profiling, antioxidant and antimicrobial properties of different solvent extracts of Malaysian *Plectranthus amboinicus* leaves. *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*, 2017(1), Article 1517683. <https://doi.org/10.1155/2017/1517683>
92. Nazemi, M., Motalebi, A., Abbasi, E., Khaleidi, M., Zare, M. (2022). Antibacterial, antifungal, and cytotoxic activity of the fraction. *Iranian Journal of Fisheries Sciences*, 21(6), 1495–1507. <https://doi.org/10.22092/ijfs.2023.128416>
93. Dmitrieva, A., Vesnina, A., Dyshlyuk, L. (October 6–7, 2021). *Antioxidant and antimicrobial properties of squalene from Symphytum officinale and chlorogenic acid from trifolium pratense*. The 2nd international scientific conference «Ecosystems without borders — 2021» AIP Publishing, 2022. <https://doi.org/10.1063/5.0104513>
94. Bindu, B. S. C., Mishra, D. P., Narayan, B. (2015). Inhibition of virulence of *Staphylococcus aureus* — A food borne pathogen — by squalene, a functional lipid. *Journal of Functional Foods*, 18(Part A), 224–234. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2015.07.008>
95. Dordab, T., Sourinejad, I., Nazemi, M. (2021). Antibacterial effect of the squalene extracted from the liver of the Persian Gulf spot tail shark *Carcharhinus sorrah* (Müller & Henle, 1839). *Journal of Fisheries Science and Technology*, 10(2), 251–258. <https://doi.org/10.33804/pp.006.03.4332> (In Arabic)
96. Bhat, M. P., Rudrappa, M., Hugar, A., Gunagambhire, P. V., Kumar R. S., Naya, S. et al. (2023). *In-vitro* investigation on the biological activities of squalene derived from the soil fungus *Talaromyces pinophilus*. *Heliyon*, 9(11), Article e21461. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e21461>
97. Youl, O., Konate, S., Sombié, E. N., Boly, R., Kabore, B., Koala, M. et al. (2024). Phytochemical analysis and antimicrobial activity of *Lawsonia inermis* leaf extracts from burkina faso. *American Journal of Plant Sciences*, 15(7), 552–576. <https://doi.org/10.4236/ajps.2024.157038>
98. Fang, J.-Y., Lin, Y.-K., Wang, P.-W., Alalawi, A., Yang, Y.-C., Yang, S.-C. (2019). The droplet-size effect of squalene@cetylpyridinium chloride nanoemulsions on antimicrobial potency against planktonic and biofilm MRSA. *International Journal of Nanomedicine*, 2019(14), 8133–8147. <https://doi.org/10.2147/IJN.S221663>
99. Güneş, F. E. (2013). Medical use of squalene as a natural antioxidant. *Journal of Marmara University Institute of Health Sciences*, 3(4), 221–229. <https://doi.org/10.5455/musbed.20131213100404>
100. Du Preez, H. E. I. D. I. (2007). Squalene — antioxidant of the future. *South African Journal of Natural Medicine*, 33, 106–112.
101. Senthilkumar, S., Yogeeta, S. K., Subashini, R., Devaki, T. (2006). Attenuation of cyclophosphamide induced toxicity by squalene in experimental rats. *Chemico-Biological Interactions*, 160(3), 252–260. <https://doi.org/10.1016/j.cbi.2006.02.004>
102. Chen, C.-H., Huang, T.-H., Elzoghby, A. O., Wang, P.-W., Chang, C.-W., Fang, J.-Y. (2017). Squarticles as the nanoantidotes to sequester the overused antidepressant for detoxification. *International Journal of Nanomedicine*, 2017(12), 8071–8083. <https://doi.org/10.2147/IJN.S143370>
103. Kelly, G. S. (1999). Squalene and its potential clinical uses. *Alternative Medicine Review: A Journal of Clinical Therapeutic*, 44(1), 29–36.
104. Ronco, A. L., De Stefani, E., Ronco, A. (2013). Squalene: A multi-task link in the crossroads of cancer and aging. *Functional Foods in Health and Disease*, 3(12), 462–476. <https://doi.org/10.13198/fhfd.v3i12.30>
105. Renda, G., Gökkaya, İ., Şöhretoglu, D. (2022). Immunomodulatory properties of triterpenes. *Phytochemistry Reviews*, 21(2), 537–563. <https://doi.org/10.1007/s11101-021-09785-x>
106. Uysal, N. (2024). The role of two triterpenes in immune system aging. Chapter in a book: Academic Studies in the Field of Biology, Seriven Yayın Evi, Ankara, 2024.
107. Sánchez-Quesada, C., López-Biedma, A., Toledo, E., Gaforio, J. J. (2018). Squalene stimulates a key innate immune cell to foster wound healing and tissue repair. *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*, 2018(1), Article 9473094. <https://doi.org/10.1155/2018/9473094>
108. Ulrikh, E. V., Smolovskaya, O. V. (2022). Evaluation of anti-inflammatory and wound healing properties of squalene: An important phytochemical component of amaranth oil. *International Journal of Chemical and Biochemical Sciences*, 21, 54–60.
109. Ibrahim, N. I., Mohamed, I. N. (2021). Interdependence of anti-inflammatory and antioxidant properties of squalene — implication for cardiovascular health. *Life*, 11(2), Article 103. <https://doi.org/10.3390/life11020103>
110. Cárdeno, A., Aparicio-Soto, M., la Paz, S. M.-D., Bermudez, B., Muriana, F. J. G., Alarcón-De-La-Lastra, C. (2015). Squalene targets pro- and anti-inflammatory mediators and pathways to modulate over-activation of neutrophils, monocytes and macrophages. *Journal of Functional Foods*, 14, 779–790. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2015.03.009>
111. Chang, M., Xue, J., Sharma, V., Habtezion, A. (2015). Protective role of Heme-oxygenase-1 in gastrointestinal diseases. *Cellular and Molecular Life Sciences*, 72, 1161–1173. <https://doi.org/10.1007/s00018-014-1790-1>
112. Widayawati, T., Syahputra, R. A., Syarifah, S., Sumantri, I. B. (2023). Analysis of antidiabetic activity of squalene *in vitro* and *in vivo* assay. *Molecules*, 28(9), Article 3783. <https://doi.org/10.3390/molecules28093783>
113. Khullar, M., Al-Shudiefat, A. A. S., Ludke, A., Binopal, G., Singal, P. K. (2010). Oxidative stress: A key contributor to diabetic cardiomyopathy. *Canadian Journal of Physiology and Pharmacology*, 88, 233–240. <https://doi.org/10.1139/Y10-016>
114. Rochette, L., Zeller, M., Cottin, Y., Vergely, C. (2014). Diabetes, oxidative stress and therapeutic strategies. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) — General Subjects*, 1840(9), 2709–2729. <https://doi.org/10.1016/j.bbagen.2014.05.017>
115. Zhang, P., Liu, N., Xue, M., Zhang, M., Xiao, Z., Xu, C. et al. (2023). Anti-inflammatory and antioxidant properties of squalene in copper sulfate-induced inflammation in zebrafish (*Danio rerio*). *International Journal of Molecular Sciences*, 24(10), Article 8518. <https://doi.org/10.3390/ijms24108518>
116. Fernando, I. P. S., Sanjeewa, K. K. A., Samarakoon, K. W., Lee, W. W., Kim, H.-S., Jeon, Y.-J. (2018). Squalene isolated from marine macroalgae *Caulerpa racemosa* and its potent antioxidant and anti-inflammatory activities. *Journal of Food Biochemistry*, 42(5), Article e12628. <https://doi.org/10.1111/jfbc.12628>
117. Latief, M., Muhaimin, M., Amanda, H., Prahandika, G., Tarigan, I. L. (2020). Anti-inflammatory activities of squalene compound of methanol extract of *Abroma augusta* L. *Jurnal Teknologi Laboratorium*, 9(2), 176–185. <https://doi.org/10.29238/teknolabjournal.v9i2.228>
118. Jose, S. P., Sukumaran, S., Mohanan, R., Saji, S., Asish, A., George, S. M. (2023). Anti-inflammatory effect of squalene isolated from *Simarouba glauca* in experimental animal model. *Pharmacognosy Research*, 15(4), 658–666. <https://doi.org/10.5530/pres.15.4.069>
119. Cheng, Y., Fei, T., Liu, Y., Chen, S., Wang, Z. et al. (2024). Ultrasound-assisted extraction of squalene and 2-Acetyl-1-Pyrroline from pandan leaf: The effects of drying methods and extraction conditions. *Foods*, 13(24), Article 4010. <https://doi.org/10.3390/foods13244010>
120. Chan, Y.-J., Chiu, C.-S., Li, P.-H., Lu, W.-C. (2024). Evaluation of different roasting condition on yield, physico-chemical characteristics, and antioxidant activity of cold-pressed sacha inchi (*Plukenetia volubilis*) oil. *LWT*, 203, Article 116343. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2024.116343>
121. Widayawati, T., Syarifah, S., Sumantri, I. B. (August 24–25, 2021). *Squalene decreased malondialdehyde level of diabetic rats*. 3rd International Conference on Natural Resources and Technology. Medan, Indonesia, 2022. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/912/1/012054>
122. Bidooki, S. H., Alejo, T., Sánchez-Marco, J., Martínez-Beamonte, R., Abuobaid, R., Burillo, J. C. et al. (2022). Squalene loaded nanoparticles effectively protect hepatic AML12 cell lines against oxidative and endoplasmic reticulum stress in aTXNDC5-dependent way. *Antioxidants*, 11(3), Article 581. <https://doi.org/10.3390/antiox11030581>
123. Permadi, A., Wilson, M. (2024). Review: Exploration of squalene from natural materials as its potential in health and food fields. *Indonesian Journal of Chemical Engineering*, 2(2), 79–89.
124. Grajzer, M., Szmalc, K., Kuźmiński, Ł., Witkowski, M., Kulma, A., Prescha, A. (2020). Characteristics and antioxidant potential of cold-pressed oils — possible strategies to improve oil stability. *Foods*, 9(11), Article 1630. <https://doi.org/10.3390/foods9111630>
125. Seğmeler, Ö., Güçlü Üstündağ, Ö. (2017). Behavior of lipophilic bioactives during olive oil processing. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 119(9), Article 1600404. <https://doi.org/10.1002/ejlt.201600404>
126. Manalu, L. P., Adinegoro, H., Yustiningsih, N., Astuti, Luthfyanti, R., Maisaroh, et al. (2025). Impact of drying methods on bioactive compounds and antioxidant properties of *Kalanchoe ceratophylla*. *Scientifica*, 2025(1), Article 7146758. <https://doi.org/10.1155/sci5/7146758>
127. Arora, S., Kumar, G. (2018). Phytochemical screening of root, stem and leaves of *Cenchrus biflorus* Roxb. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 7(1), 1445–1450.
128. Rajamani, K., Thirugnanasambandan, S. S., Natesan, C., Subramaniam, S., Thangavel, B., Aravindan, N. (2021). Squalene deters drivers of RCC disease progression beyond VHL status. *Cell Biology and Toxicology*, 37, 611–631. <https://doi.org/10.1007/s10565-020-09566-w>
129. Loganathan, R., Radhakrishnan, A. K., Selvaduray, K. R., Nesaretnam, K. (2015). Selective anti-cancer effects of palm phytonutrients on human breast cancer cells. *RSC Advances*, 5(3), 1745–1753. <https://doi.org/10.1039/c4ra12343c>
130. Ahn, Y. K., Kim, J. H. (1992). Effects of squalene on the immune responses in mice (II): Cellular and non-specific immune response and antitumor activity of squalene. *Archives of Pharmacological Research*, 15, 20–29. <https://doi.org/10.1007/BF02973979>

131. Yin, G., Zeng, H., He, M., Wang, M. (2009). Extraction of *Teucrium manghuaense* and evaluation of the bioactivity of its extract. *International Journal of Molecular Sciences*, 10(10), 4330–4341. <https://doi.org/10.3390/ijms10104330>
132. Abuobeid, R., Sánchez-Marco, J., Felices, M. J., Arnal, C., Burillo, J. C., Lasheras, R. et al. (2022). Squalene through its post-squalene metabolites is a modulator of hepatic transcriptome in rabbits. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(8), Article 4172. <https://doi.org/10.3390/ijms23084172>
133. Smith, T. J. (2000). Squalene: Potential chemopreventive agent. *Expert Opinion on Investigational Drugs*, 9(8), 1841–1848. <https://doi.org/10.1517/13543784.9.8.1841>
134. Newmark, H. L. (1999). Squalene, olive oil, and cancer risk: Review and hypothesis. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 889(1), 193–203. <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.1999.tb08735.x>
135. Babich, O., Larina, V., Ivanova, S., Tarasov, A., Povydysh, M., Orlova, A. et al. (2022). Phytotherapeutic approaches to the prevention of age-related changes and the extension of active longevity. *Molecules*, 27(7), Article 2276. <https://doi.org/10.3390/molecules27072276>
136. Bhilwade, H.N., Tatewaki, N., Nishida, H., Konishi, T. (2010). Squalene as novel food factor. *Current Pharmaceutical Biotechnology*, 11(8), 875–880. <https://doi.org/10.2174/138920110795262088>
137. Sponton, O. E., Perez, A. A., Osella, C., Cuffia, F., Fenoglio, C., Piagentini, A. (2023). Squalene encapsulation by emulsification and freeze-drying process: Effects on bread fortification. *Journal of Food Science*, 88(6), 2523–2535. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.16576>
138. Kumar, L. R. G., Kumar, H. S., Tejpal, C. S., Anas, K. K., Nayak, B. B., Sarika, K. et al. (2021). Exploring the physical and quality attributes of muffins incorporated with microencapsulated squalene as a functional food additive. *Journal of Food Science and Technology*, 58, 4674–4684. <https://doi.org/10.1007/s13197-020-04955-9>
139. Barp, L., Višnjevec, A.M., Moret, S. (2024). Analytical determination of squalene in extra virgin olive oil and olive processing by-products, and its valorization as an ingredient in functional food — A critical review. *Molecules*, 29(21), Article 5201. <https://doi.org/10.3390/molecules29215201>
140. Buddhan, S., Sivakumar, R., Dhandapani, N., Ganesan, B., Anandan, R. (2007). Protective effect of dietary squalene supplementation on mitochondrial function in liver of aged rats. *Prostaglandins, Leukotrienes and Essential Fatty Acids*, 76(6), 349–355. <https://doi.org/10.1016/j.plefa.2007.05.001>
141. Micera, M., Botto, A., Geddo, F., Antonietti, S., Berteau, C. M., Levi, R. et al. (2020). Squalene: More than a step toward sterols. *Antioxidants*, 9(8), Article 688. <https://doi.org/10.3390/antiox9080688>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ	AUTHOR INFORMATION
Принадлежность к организации	Affiliation
Ульрих Елена Викторовна — доктор технических наук, профессор, кафедра инжиниринга технологического оборудования, Калининградский государственный технический университет 236022, Калининград, проспект Советский, 1 E-mail: elena.ulrikh@klgtu.ru ORCID: http://orcid.org/0000-0003-4107-7277 * автор для контактов	Elena V. Ulrikh , Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Technological Equipment Engineering, Kaliningrad State Technical University 1, Prospekt Sovetskiiy, 236022, Kaliningrad, Russia E-mail: elena.ulrikh@klgtu.ru ORCID: http://orcid.org/0000-0003-4107-7277 * corresponding author
Сухих Станислав Алексеевич — доктор технических наук, доцент, заведующий лабораторией, Балтийский Федеральный университет им. И. Канта 236041, Калининград, ул. А. Невского, 14 E-mail: stas-asp@mail.ru ORCID: http://orcid.org/0000-0001-7910-8388	Stanislav A. Sukhikh , Doctor of Technical Sciences., Docent, Head of Laboratory, Immanuel Kant Baltic Federal University 14, Nevsky str., 236041, Kaliningrad, Russia E-mail: stas-asp@mail.ru ORCID: http://orcid.org/0000-0001-7910-8388
Самусев Илья Геннадьевич — кандидат физико-математических наук, врио проректора по научной работе, Балтийский Федеральный университет им. И. Канта 236041, Калининград, ул. А. Невского, 14 E-mail: is.cranz@gmail.com ORCID: http://orcid.org/0000-0001-5026-7510	Ilya G. Samusev , Candidate of Physico-Mathematical Sciences, Acting Vice-Rector for Research, Immanuel Kant Baltic Federal University 14, Nevsky str., 236041, Kaliningrad, Russia E-mail: is.cranz@gmail.com ORCID: http://orcid.org/0000-0001-5026-7510
Бабич Ольга Олеговна — доктор технических наук, доцент, директор Научно-образовательного центра, Балтийский Федеральный университет им. И. Канта 236041, Калининград, ул. А. Невского, 14 E-mail: olich.43@mail.ru ORCID: http://orcid.org/0000-0002-4921-8997	Olga O. Babich , Doctor of Technical Sciences, Docent, Director of the Scientific and Educational Center, Immanuel Kant Baltic Federal University 14, Nevsky str., 236041, Kaliningrad, Russia E-mail: olich.43@mail.ru ORCID: http://orcid.org/0000-0002-4921-8997
Критерии авторства	Contribution
Станислав Сухих : концептуализация, методология, администрирование проекта. Ольга Бабич : написание — рецензирование и редактирование. Илья Самусев : методология, формальный анализ. Елена Ульрих : написание — черновик, рецензирование и редактирование, расследование.	Stanislav Sukhikh : conceptualization, methodology, project administration. Olga Babich : writing — review & editing. Ilya Samusev : methodology, formal analyses. Elena Ulrikh : writing — original draft, review & editing, investigation.
Конфликт интересов	Conflict of interest
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.	The authors declare no conflict of interest.

DOI: <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-4-595-606>



Received 11.10.2025

Accepted in revised 10.12.2025

Accepted for publication 12.12.2025

© Edo G. I., Mafe A. N., Gaaz T. S., Iwanegbe I., Jikah A. N.,
Emumejaye K., Yousif E., Owheru J. O., Igbuku U. A., Oghrora, E. E. A.,
Makia R. S., Essaghah A. E. A., Ahmed D. S., Umar H., 2025

Available online at <https://www.fsjour.com/jour>

Review article

Open access

FOOD-CONTACT SURFACES COATED WITH ANTIMICROBIAL POLYMERIC MATERIALS

Great I. Edo^{1,2,*}, Alice N. Mafe³, Tayser S. Gaaz⁴, Izuwa Iwanegbe⁵, Agatha N. Jikah⁶, Kugbere Emumejaye⁷,
Emad Yousif², Joseph O. Owheru⁸, Ufuoma A. Igbuku¹, Ephraim E. A. Oghrora⁹, Raghda S. Makia¹⁰,
Arthur E. A. Essaghah¹¹, Dina S. Ahmed¹², Huzaifa Umar¹³

¹Department of Chemistry, Faculty of Science, Delta State University of Science and Technology, Ozoro, Delta State, Nigeria

²Department of Chemistry, College of Sciences, Al-Nahrain University, Baghdad, Iraq

³Department of Biological Sciences, Faculty of Science, Taraba State University Jalingo, Taraba State, Nigeria

⁴Department of Prosthetics and Orthotics Engineering, College of Engineering and Technologies, Al-Mustaqbal University, Babylon, Iraq

⁵Department of Food Science and Nutrition, Faculty of Agriculture, University of Benin, Benin City, Nigeria

⁶Department of Pharmacy, Faculty of Pharmacy, Near East University, Nicosia, Cyprus

⁷Department of Physics, Faculty of Science, Delta State University of Science and Technology, Ozoro, Delta State, Nigeria

⁸Department of Food Science and Technology, Faculty of Science, Delta State University of Science and Technology,
Ozoro, Delta State, Nigeria

⁹Department of Petroleum Chemistry, Faculty of Science, Delta State University of Science and Technology, Ozoro, Delta State, Nigeria

¹⁰Department of Plant Biotechnology, College of Biotechnology, Al-Nahrain University, Baghdad, Iraq

¹¹Department of Urban and Regional Planning, Faculty of Environmental Sciences, Delta State University of Science and Technology,
Ozoro, Delta State, Nigeria

¹²Department of Chemical and Petroleum Industries Engineering Techniques, Polytechnic College of Engineering Specializations —
Baghdad, Middle Technical University, Baghdad, Iraq

¹³Operational Research Center in Healthcare, Near East University, Nicosia, Cyprus

KEYWORDS:

*antimicrobial coatings,
food safety, polymeric
materials, microbial
contamination, food
contact surfaces*

ABSTRACT

The growing demand for improved food safety has fueled significant interest in antimicrobial polymeric coatings for food contact surfaces. This review offers a thorough examination of various antimicrobial coatings, including natural biopolymer-based, synthetic, and hybrid composites, spotlighting their modes of action and effectiveness in combating microbial contamination. It explores key antimicrobial agents such as metal-based compounds, natural antimicrobials, and synthetic chemicals, discussing their unique properties and potential applications. Equally, the review evaluates different testing methods for antimicrobial efficacy and identifies critical performance factors, including environmental conditions, surface properties, and the type of microbial contaminants. The hurdles and limitations of these coatings are also addressed, including concerns about durability, health and environmental impacts, and economic viability. Through detailed case studies, this review synthesizes current knowledge and offers insights into future research, with a particular focus on biodegradable polymers and innovative natural antimicrobials. The findings emphasize the potential of antimicrobial coatings to enhance food safety and inform the development of sustainable food packaging technologies, supporting advancements in health-conscious and environmentally friendly industrial applications.

Поступила 11.10.2025

Поступила после рецензирования 10.12.2025

Принята в печать 12.12.2025

© Эдо Г. И., Мафе Э. Н., Гааз Т. С., Иванегбе И., Джиках А. Н.,
Эмумеджайе К., Юсиф Э., Оверуо Дж. О., Игбуку У. А., Оггоро Э. Э. А.,
Макия Р. С., Эссагах А. Э. А., Ахмед Д. С., Умар Х., 2025

<https://www.fsjour.com/jour>

Обзорная статья

Открытый доступ

ПОВЕРХНОСТИ С АНТИМИКРОБНЫМИ ПОЛИМЕРНЫМИ ПОКРЫТИЯМИ, КОНТАКТИРУЮЩИЕ С ПИЩЕВЫМИ ПРОДУКТАМИ

Эдо Г.И.^{1,2,*}, Мафе Э. Н.³, Гааз Т. С.⁴, Иванегбе И.⁵, Джиках А. Н.⁶, Эмумеджайе К.⁷, Юсиф Э.²,
Оверуо Дж. О.⁸, Игбуку У. А.¹, Оггоро Э. Э. А.⁹, Макия Р. С.¹⁰, Эссагах А. Э. А.¹¹, Ахмед Д. С.¹², Умар Х.¹³

¹Кафедра химии, Факультет естественных наук, Государственный университет науки и технологий Дельта,
Озоро, штат Дельта, Нигерия

²Химический факультет, Колледж естественных наук, Университет Аль-Нахраин, Багдад, Ирак

³Кафедра биологических наук, Факультет естественных наук, Государственный университет Тараба,
Джалинго, штат Тараба, Нигерия

⁴Кафедра протезирования и ортопедической инженерии, Инженерно-технологический колледж,
Университет Аль-Мустакаль, Бабилен, Ирак

⁵Кафедра пищевых наук и питания, Сельскохозяйственный факультет, Университет Бенина, Бенин-сити, Нигерия

⁶Кафедра фармацевтики, Фармацевтической факультет, Ближневосточный университет, Никозия, Кипр

⁷Кафедра физики, Факультет естественных наук, Государственный университет науки и технологий Дельта,
Озоро, штат Дельта, Нигерия

⁸Кафедра пищевой науки и технологии, Факультет естественных наук,
Государственный университет науки и технологий Дельта, Озоро, штат Дельта, Нигерия

FOR CITATION: Edo, G. I., Mafe, A.N., Gaaz, T.S., Iwanegbe, I., Jikah, A.N.,
Emumejaye, K. et al. (2025). Food-contact surfaces coated with antimicrobial
polymeric materials. *Food Systems*, 8(4), 595–606. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-4-595-606>

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Эдо, Г.И., Мафе, Э.Н., Гааз, Т.С., Иванегбе, И., Джиках, А.Н., Эмумеджайе, К. и др. (2025). Поверхности с антимикробными полимерными покрытиями, контактирующие с пищевыми продуктами. *Пищевые системы*, 8(4), 595–606. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-4-595-606>

⁹Кафедра химии нефти, Факультет естественных наук, Государственный университет науки и технологий Дельта, Озоро, штат Дельта, Нигерия

¹⁰Кафедра биотехнологии растений, Колледж биотехнологии, Университет Аль-Нахреин, Багдад, Ирак

¹¹Кафедра городского и регионального планирования, Факультет экологических наук,

Государственный университет науки и технологий Дельта, Озоро, штат Дельта, Нигерия

¹²Факультет инженерных технологий химической и нефтяной промышленности, Политехнический колледж инженерных специальностей — Багдад, Средний технический университет, Багдад, Ирак

¹³Центр оперативных исследований в области здравоохранения, Ближневосточный университет, Никозия, Кипр

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: АННОТАЦИЯ

антимикробные
покрытия,
безопасность
пищевых продуктов,
полимерные
материалы,
микробное
загрязнение,
поверхности,
контактирующие
с пищевыми
продуктами

Растущий спрос на повышение безопасности пищевых продуктов обусловил значительный интерес к антимикробным полимерным покрытиям для поверхностей, входящих в контакт с пищевыми продуктами. В этой статье подробно рассматриваются различные антимикробные покрытия, в том числе изготовленные на основе природных биополимеров, синтетических и гибридных композитов, освещаются механизмы их действия и эффективность в профилактике микробного загрязнения. В статье рассматриваются такие основные противомикробные средства, как соединения на основе металлов, природные противомикробные препараты и синтетические химикаты, обсуждаются их уникальные свойства и потенциальные сферы применения. Кроме того, в обзоре оцениваются различные методы тестирования антимикробной эффективности и выявляются критические факторы эффективности, включая условия окружающей среды, свойства поверхности и тип микробиологических загрязнений. Также рассматриваются препятствия и ограничения, связанные с применением таких покрытий, включая проблемы их долговечности, их воздействие на здоровье потребителя и на окружающую среду, а также экономическую целесообразность их применения. На основе подробных тематических исследований этот обзор обобщает современные знания, и предлагает идеи для будущих исследований, уделяя особое внимание биоразлагаемым полимерам и инновационным противомикробным средствам природного происхождения. Полученные результаты подчеркивают потенциал антимикробных покрытий в деле повышения безопасности пищевых продуктов, и служат основой для разработки экологически и экономически рациональных технологий упаковки пищевых продуктов, способствуя их продвижению в области промышленных применений, ориентированных на поддержание здоровья человека и экологии окружающей среды.

1. Introduction

Using of antimicrobial polymeric coatings in the food industry marks a significant advancement in ensuring food safety and maintaining quality standards [1]. These coatings are specifically designed to reduce microbial contamination risks on the food contact surfaces [2], thus handling critical concerns such as foodborne illnesses, spoilage, and the economic losses associated with these issues [3]. By embedding antimicrobial agents within polymer matrices [4], these coatings actively inhibit or eliminate microbial growth on surfaces that come into direct contact with food products [5]. This innovation plays a pivotal role in food processing, packaging, and storage, where contamination is a constant challenge [6]. Over time, research efforts have focused on enhancing the functionality of these coatings [7], utilizing natural, synthetic [8], and hybrid antimicrobials with diverse mechanisms of action to combat various microbial pathogens [9]. As well, these coatings are engineered to withstand various environmental conditions, including fluctuations in temperature and humidity common in food production and storage environments [10].

Ensuring the hygiene and safety of food contact surfaces is essential to prevent microbial contamination and uphold food safety standards [11]. Surfaces such as conveyor belts, cutting boards, storage containers, and packaging materials are frequently exposed to microorganisms that thrive in food environments [12]. Contamination of these surfaces can compromise food safety and facilitate the transmission of foodborne pathogens to the consumers [13], posing significant public health risks [14]. Pathogens such as *Escherichia coli*, *Salmonella* spp., and *Listeria* spp. have often been linked to insufficient sanitation and poor hygiene practices in food production and handling facilities [15]. While traditional cleaning and sanitation methods are efficient [16], yet they may not fully eradicate resilient microorganisms or address biofilm formation [17], which provides a protective habitat for pathogens and fosters persistent contamination [18].

Antimicrobial coatings offer an additional, long-lasting layer of protection against microbial contamination on food contact surfaces [19]. These coatings provide continuous antimicrobial activity, effectively reducing microbial loads and preventing biofilm formation, which routine cleaning methods may struggle to manage [20]. By incorporating these coatings, the food industry can comply with safety regulations [21]. Moreover, antimicrobial coatings reduce the need for frequent cleaning cycles, minimize chemical substances usage [22], and help protect food processing equipment from microbial-induced corrosion and degradation, ultimately extending its operational lifespan [23].

This review delves into the incorporation of antimicrobial properties into polymeric coatings for food contact surfaces [24], focusing on their types, mechanisms of action, and factors influencing their effectiveness [25]. It examines natural biopolymer-based coatings, synthetic polymer coatings [26], and hybrid systems, focusing on their unique properties and benefits in combating microbial threats in food environ-

ments [27]. The review evaluates the antimicrobial agents embedded into these coatings, such as metal-based compounds, natural antimicrobials, and synthetic chemicals, alongside laboratory and field-testing methods to assess their efficacy under varying environmental conditions. Emphasizing prevention of biofilm formation and long-term activity, it also addresses issues like regulatory constraints, safety concerns, and cost implications of large-scale applications. By offering insights into the limitations and future directions for sustainable, biodegradable solutions, this review serves as a valuable resource for food safety professionals and manufacturers, thus aiming to enhance food contact surface safety. The aim of this research is to provide a comprehensive realization of antimicrobial polymeric coatings, to enable their effective application in order to improve food safety and public health.

2. Objects and methods

Scientific articles used for this review were retrieved from Scopus, PubMed, ScienceDirect, and Google Scholar databases. These databases were selected for their broad coverage of peer-reviewed scientific literature in antimicrobial coatings, polymeric materials, microbial contamination, food contact surfaces and food safety. The inclusion criteria focused on articles addressing antimicrobial coatings, food safety, polymeric materials, microbial contamination, food contact surfaces. Only English-language publications from 2015 to 2025 were considered to ensure recent and relevant findings. E-books, book chapters, review articles, and research papers that met these criteria were included. Exclusion criteria involved articles unrelated to microbial contamination in antimicrobial coatings, food safety, polymeric materials, microbial contamination, food contact surfaces, those lacking scientific evidence, or those outside the defined scope. The initial search retrieved a large number of studies from each database using specific keywords. Duplicate records were identified and removed using reference management software to maintain accuracy and prevent redundancy. Titles, abstracts, and full texts of the remaining articles were screened to ensure relevance to the review's objectives. The final selection was based on the studies' scientific quality, methodological soundness, and alignment with the scope of this review. The keywords used in the searches included: antimicrobial coatings, food safety, polymeric materials, microbial contamination, and food contact surfaces.

3. Types of antimicrobial polymeric coatings

Antimicrobial polymeric coatings are crucial for improving food safety by preventing microbial contamination on food contact surfaces [28]. These coatings are divided into three main categories: natural biopolymer-based coatings, synthetic polymeric ones, and hybrid or composite coatings [29]. Each type offers unique properties, advantages, and mechanisms, making them suitable for various food industry applications [30]. Getting familiar and acknowledging these coatings is essential for assessing their effectiveness in resolving the foodborne pathogens issues and spoilage concerns [31].

3.1. Natural biopolymer-based coatings

Natural biopolymer-based coatings are derived from biological sources such as plants, animals, and microorganisms [32]. They are valued for their biocompatibility, biodegradability, and antimicrobial properties, that make them safe for food applications without toxicity risks [33]. These coatings, including chitosan, alginate, gelatin, and cellulose derivatives, provide eco-friendly alternatives to synthetic coatings, which may raise concerns about environmental pollution persistence and chemical residues [34].

3.1.1. Chitosan

Chitosan, a polysaccharide sourced from chitin found in crustacean and insect exoskeletons, is widely studied for its antimicrobial properties [35]. Its amino groups interact with microbial cell walls, disrupting them and causing cell death [36]. Chitosan also forms semi-permeable films that reduce oxidation and spoilage, extending food shelf life [37]. Its antimicrobial efficacy can be enhanced by adding essential oils (e. g., thyme or oregano) or nanoparticles (e. g., silver or zinc oxide), improving its mechanical properties and broadening its antimicrobial spectrum of activity [38].

3.1.2. Alginate

Alginate, a polysaccharide from brown seaweed, is a popular biopolymer in food coatings due to its excellent film-forming properties and biocompatibility [39]. It forms hydrogels in the presence of divalent ions like calcium. While alginate itself features only limited antimicrobial activity, it effectively carries antimicrobial agents such as organic acids, essential oils, or bacteriocins [40]. It is commonly used to coat fresh-cut fruits, vegetables [41], fish, and poultry, due to enhancing moisture retention and inhibiting microbial growth [42]. Alginate's gel-like film supports the controlled release of antimicrobial agents, offering sustained protection [43]. For example, alginate coatings with nisin are able to inhibit growth of *Listeria monocytogenes*. Alongside, alginate reduces moisture loss and oxidation, maintaining food texture and freshness [44].

3.1.3. Gelatin

Gelatin, a protein derived from collagen hydrolysis, is valued for its high-quality film formation and compatibility with antimicrobial agents [45]. It is used in edible coatings for meats, seafood, and dairy products prone to spoilage [46]. Gelatin-based films are often enhanced with organic acids, enzymes, or essential oils to combat pathogens like *Escherichia coli* and *Staphylococcus aureus* [47]. The antimicrobial effect depends on incorporated agents [48], such as cinnamon or clove essential oils [49]. Gelatin coatings also act as moisture and oxygen barriers, thus reducing lipid oxidation and microbial growth to preserve food quality [50].

3.1.4. Cellulose derivatives

Cellulose derivatives, such as methylcellulose and hydroxypropyl methylcellulose, are widely used in food coatings for their film-forming ability, biodegradability, and transparency [51]. Though inherently non-antimicrobial [52], cellulose films can be functionalized with organic acids or essential oils, such as rosemary or tea tree oil, to inhibit pathogens like *Salmonella* spp. and *Listeria* spp. [53]. These coatings are ideal for fresh produce, maintaining texture and freshness by reducing moisture loss while preserving visual appeal [54]. Table 1 provides an overview of key polymeric coatings used in antimicrobial applications, including their sources, commonly incorporated antimicrobial agents, primary food applications, and benefits for food safety and preservation. Table 2 presents case studies, showcasing the antimicrobial effectiveness of natural biopolymer-based coatings, featuring their use with various agents on various food products, targeting specific microorganisms, and achieving notable results in enhancing food safety and quality.

Natural biopolymer-based antimicrobial coatings, such as alginate, chitosan [71], gelatin, and modified cellulose, offer significant benefits for food safety and quality preservation. These biopolymers create effective barriers against microbial contamination and promote environmental sustainability through their biodegradability [72]. By incorporating natural antimicrobial agents, these coatings improve food standards and extend shelf life [73], this way meeting consumer demand for safer

Table 1. Overview of antimicrobial polymeric coatings, their origins, and applications

Таблица 1. Обзор антимикробных полимерных покрытий, источников их происхождения и способов применения

Coating type	Source	Antimicrobial agents	Applications	Key benefits
Chitosan-based	Crustaceans (e. g., shrimp)	Essential oils, organic acids	Fruits, vegetables, meats	Biodegradable, broad-spectrum activity [55]
Alginate-based	Brown seaweed	Nisin, organic acids	Fresh-cut produce, poultry, seafood	Moisture retention, prolonged shelf life [56]
Gelatin-based	Animal collagen	Essential oils, enzymes	Meat, seafood, dairy products	Biocompatibility, oxygen barrier [57]
Cellulose Derivatives	Plant cell walls	Organic acids, essential oils	Fresh produce, bakery items	Transparent, moisture control [58]
Polyethylene (PE)	Petrochemical	Silver nanoparticles, quaternary ammonium	Fresh produce, bakery, dairy items	Moisture barrier, microbial resistance [59]
Polypropylene (PP)	Petrochemical	Chitosan, essential oils	Ready-to-eat meals, microwave containers	High heat resistance, flexible [60]
Polyvinyl chloride (PVC)	Petrochemical	Triclosan, silver ions	Fresh meat, fish, produce	Oxygen barrier, high clarity
Polylactic acid (PLA)	Corn starch, sugarcane	Natural plant extracts	Ready-to-eat meals, deli wraps	Compostable, renewable source
Polyglycolic Acid (PGA)	Sugar fermentation	Silver nanoparticles	Vacuum-sealed meat, fish	Excellent gas barrier, biodegradable
Polyhydroxyalkanoates (PHA)	Bacterial fermentation	Organic acids, essential oils	Fresh produce, dairy packaging	Fully biodegradable, high versatility [61]

Table 2. Case studies on the antimicrobial effectiveness of natural biopolymer-based coatings

Таблица 2. Примеры исследований антимикробной эффективности покрытий, изготовленных на основе природных биополимеров

Biopolymer coating	Antimicrobial agent	Food product	Target microorganisms	Efficacy outcome
Chitosan	Oregano essential oil	Fresh-cut apples	<i>E. coli</i> , <i>S. aureus</i> , <i>Salmonella</i> spp.	Reduced microbial load, extended shelf life [62]
Alginate	Nisin	Ready-to-eat turkey slices	<i>Listeria monocytogenes</i>	Inhibited <i>Listeria</i> sp. growth, enhanced preservation [63]
Gelatin	Carvacrol	Fresh strawberries	<i>Botrytis cinerea</i> , <i>E. coli</i>	Reduced fungal and bacterial contamination, longer freshness [64]
Cellulose Derivative	Clove essential oil	Fresh tomatoes	<i>E. coli</i> , <i>Pseudomonas</i> spp.	Lowered microbial counts, maintained color and firmness [65]
starch-based coating	Garlic extract	Fresh-cut carrots	<i>S. aureus</i> , <i>Listeria monocytogenes</i>	Inhibited microbes, reduced spoilage
Pectin-based coating	Cinnamon essential oil	Fresh cherries	<i>Alternaria</i> spp., <i>Penicillium</i> spp.	Suppressed fungal growth, delayed ripening [66]
Xanthan gum	Green tea extract	Fresh fish fillets	<i>Vibrio</i> spp., <i>Pseudomonas</i> spp.	Reduced spoilage microorganisms, odor control [67]
Pullulan	Lemon peel extract	Fresh lettuce	<i>E. coli</i> , <i>Listeria monocytogenes</i>	Improved microbial safety, maintained texture
Carboxymethyl cellulose	Thyme ESSENTIAL OIL	Fresh chicken breast	<i>Salmonella enterica</i> , <i>Campylobacter</i> spp.	Reduced pathogen growth, extended shelf life [68]
Agar-based coating	Black pepper extract [69]	Fresh mangoes	<i>Colletotrichum</i> spp., <i>Aspergillus</i> spp.	Controlled fungal infections, prolonged shelf life [70]

solutions of natural preservation [74]. The accompanying case studies provide a thorough overview of each biopolymer's function and practical applications, making this section a comprehensive guide to natural biopolymer-based coatings [75].

3.2. Synthetic polymeric coatings

Synthetic polymeric coatings, derived from petrochemical sources, are commonly used in food packaging for their durability, flexibility, and specific barrier properties [76]. These coatings protect against moisture, oxygen, and microbial contamination, extending shelf life and food safety [77]. Popular synthetic polymers like polyethylene (PE), polypropylene (PP), and polyvinyl chloride (PVC) are often enhanced with antimicrobial agents to create active packaging solutions that inhibit microbial growth [78].

3.2.1. Polyethylene (PE)

PE is widely used due to its excellent moisture barrier, flexibility, and chemical resistance. It is available in low-density (LDPE) and high-density (HDPE) forms, with LDPE used for flexible packaging and HDPE for rigid containers [79]. PE can be infused with antimicrobial agents like silver nanoparticles and organic acids to reduce growth of pathogens (e.g., *E. coli*, *Listeria monocytogenes*). Its low permeability also helps maintain freshness in food products like baked goods, fruit and vegetables produce, and dairy [80].

3.2.2. Polypropylene (PP)

PP is known for its clarity, chemical resistance, and high thermal stability, making it ideal for microwaveable food containers and high-temperature applications [81]. It is less prone to cracking and can be modified with antimicrobial agents such as silver compounds and chitosan [82]. PP's low moisture transmission rate helps maintain the texture and moisture of fresh fruit and vegetables produce, meats, and other perishable foods [83].

3.2.3. Polyvinyl chloride (PVC)

PVC is a strong, transparent, and flexible polymer used for packaging fresh meat, poultry, and vegetable produce. It provides a strong oxygen barrier, slowing oxidation and preserving freshness [84]. When enhanced with antimicrobial agents like triclosan or silver ions, PVC inhibits microbial growth, particularly in meat and fish packaging [85]. However, concerns about certain additives have led to the exploration of safer antimicrobial alternatives [86]. As shown in Table 3, case studies compare synthetic antimicrobial coatings with natural biopolymer-based alternatives for food preservation.

Synthetic polymeric coatings, such as polyethylene, polypropylene, and polyvinyl chloride, are crucial in food packaging due to their protective properties and versatility [89]. Enhanced with antimicrobial agents, these coatings actively reduce microbial contamination, supporting food safety and extending shelf life [90]. By inhibiting spoilage organisms and pathogens, they offer a capable and cost-effective solution for preserving food quality.

3.3. Hybrid and composite coatings

Hybrid and composite coatings, that combine natural and synthetic polymers, offer enhanced food preservation [91]. These coatings integrate the biodegradability and biocompatibility of natural polymers with the strength and durability of the synthetic ones. This synergy improves antimicrobial efficacy, mechanical stability, and prolonged shelf life for perishable foods [92].

Natural polymers like chitosan [93] and alginate are combined with synthetic polymers such as polyethylene (PE) and polypropylene (PP) to

create effective antimicrobial films [32]. These coatings allow better control over antimicrobial agent release, thus offering sustained protection against microbial growth [9].

3.3.1. Benefits of hybrid and composite coatings

Hybrid coatings provide multiple advantages. Natural polymers like chitosan and alginate offer inherent antimicrobial properties, improving food safety and shelf life [94]. They are biodegradable, and relevant to environmental concerns [95], while synthetic polymers like PVA, PE, and PP add strength and durability, making the coatings suitable for food packaging and handling [96].

3.3.2. Examples of hybrid and composite coatings

Chitosan-polyethylene composites: Combine chitosan's antimicrobial activity with polyethylene's barrier properties, suitable for fresh produce and perishable items [97].

Alginate-polyvinyl alcohol (PVA) coatings: Offer biodegradability, barrier function, and flexibility, ideal for fresh fruits and vegetables. Antimicrobial agents like nisin or lysozyme enhance effectiveness [98].

Gelatin-polypropylene films: Combine gelatin's film-forming properties with polypropylene's strength, ideal for meats and dairy products [99].

Cellulose-polyvinyl chloride (PVC) Composites: Provide a durable, biodegradable option for high-moisture foods, protecting against microbes like *Listeria* spp. and *Salmonella* spp. [100].

3.3.3. Complications and considerations in hybrid coatings

Developing hybrid coatings presents obstacles, including ensuring compatibility between natural and synthetic components with differing solubilities, thermal properties, and mechanical behaviors [101]. Achieving uniform distribution of antimicrobial agents within the matrix can also impact effectiveness [102]. While hybrid coatings are more eco-friendly than fully synthetic ones, their biodegradability depends on the ratio of natural components to synthetic materials [103]. Efforts are underway to explore biodegradable synthetic polymers and bio-based additives to enhance sustainability without sacrificing antimicrobial performance or durability [104]. Table 4 demonstrates the effectiveness of hybrid/composite antimicrobial coatings in reducing microbial growth, prolonging shelf life, and preserving the sensory quality of various perishable food products.

Hybrid and composite coatings combine the strengths of natural and synthetic polymers to create effective antimicrobial barriers, offering a balance of durability and environmental sustainability. Their customization for specific food safety needs makes them a promising solution for food packaging and preservation.

4. Mechanisms of antimicrobial action in polymeric coatings

Antimicrobial polymeric coatings prevent microbial growth on food surfaces through various mechanisms [114]. These can be broadly classified into release-based and contact-active mechanisms, both essential for optimizing coating formulations for food preservation [115].

4.1. Release-based mechanisms

Release-based mechanisms involve the gradual release of antimicrobial agents, such as silver ions, from the polymeric matrix [116]. This sustained release ensures long-lasting antimicrobial action. Silver ions disrupt bacterial cell membranes, inhibit enzymatic activity, generate reactive oxygen species [117], and cause genotoxic effects [118], leading

Table 3. Case studies comparing synthetic antimicrobial coatings and natural biopolymer-based alternatives for food preservation

Таблица 3. Примеры сравнения синтетических антимикробных покрытий и их альтернатив, изготовленных на основе природных биополимеров, применяемых для сохранения свежести пищевых продуктов

Coating type	Synthetic coating	Natural coating	Food product	Target microorganisms
Polyethylene vs. chitosan	Polyethylene + silver nanoparticles	Chitosan + oregano oil	Fresh-cut apples	<i>E. coli</i> , <i>S. aureus</i> , <i>Salmonella</i> spp. [87]
Polypropylene vs. gelatin	Polypropylene + essential oils	Gelatin + carvacrol	Fresh strawberries	<i>Botrytis cinerea</i> , <i>E. coli</i>
PVC vs. alginate	PVC + triclosan	Alginate + nisin	Fresh-cut turkey	<i>Listeria monocytogenes</i>
PLA vs. starch	PLA + silver Nanoparticles	starch + garlic Extract	Fresh-cut carrots	<i>S. aureus</i> , <i>Listeria monocytogenes</i>
Polypropylene vs. pectin	Polypropylene + citric acid	pectin + Cinnamon oil	Fresh cherries	<i>Alternaria</i> spp., <i>Penicillium</i> spp.
PVC vs. xanthan gum	PVC + silver ions	xanthan gum + Green tea extract	Fish fillets	<i>Vibrio</i> sp., <i>Pseudomonas</i> sp.
Polyethylene vs. cellulose	Polyethylene + zinc oxide	Cellulose + clove oil	Fresh tomatoes	<i>E. coli</i> , <i>Pseudomonas</i> spp.
PP vs. Carboxymethyl cellulose	PP + silver ions	CMC + thyme essential oil	Fresh chicken breast	<i>Salmonella enterica</i> , <i>Campylobacter</i> spp.
PLA vs. agar	PLA + organic acids	Agar + Black Pepper Extract	Fresh mangoes	<i>Colletotrichum</i> sp., <i>Aspergillus</i> spp. [88]
PVC vs. pullulan	PVC + silver ions	Pullulan + lemon peel extract	Fresh lettuce	<i>E. coli</i> , <i>Listeria monocytogenes</i>

Table 4. Performance data of hybrid/composite antimicrobial coatings in food preservation, detailing various natural and synthetic polymer combinations, antimicrobial agents, target microorganisms, and key performance results

Таблица 4. Данные об эффективности гибридных/композитных антимикробных покрытий, используемых для сохранения свежести пищевых продуктов, с подробным описанием различных комбинаций природных и синтетических полимеров, антимикробных агентов, целевых микроорганизмов и ключевых результатов действия покрытий

Natural polymer	Synthetic polymer	Antimicrobial agent(s)	Food product	Target microorganisms
Chitosan	Polyethylene (PE)	Silver nanoparticles	Fresh produce	<i>E. coli</i> , <i>S. aureus</i> [105]
Alginate	Polyvinyl alcohol (PVA)	nisin	Fresh-cut apples	<i>Listeria monocytogenes</i>
Gelatin	Polypropylene (PP)	Thyme essential oil	Poultry	<i>Salmonella</i> spp., <i>E. coli</i> [106]
Cellulose	Polyvinyl chloride (PVC)	Zinc oxide	Fish fillets	<i>Vibrio</i> spp., <i>Pseudomonas</i> spp. [107]
Pectin	Polyethylene (PE)	Cinnamon oil	Fresh strawberries	<i>Botrytis cinerea</i> [108]
Xanthan gum	Polypropylene (PP)	Green tea extract	Leafy greens	<i>E. coli</i> , <i>Listeria monocytogenes</i> [109]
Starch	Polyvinyl alcohol (PVA)	Carvacrol	Fresh tomatoes	<i>Salmonella</i> spp., <i>E. coli</i> [110]
Carboxymethyl cellulose (CMC)	Polyethylene (PE)	Garlic extract	Ready-to-eat meats	<i>Listeria monocytogenes</i> , <i>S. aureus</i> [111]
Chitosan	Polypropylene (PP)	Oregano oil	Fresh blueberries	<i>Alternaria</i> spp., <i>Penicillium</i> sp. [112]
Gelatin	Polyvinyl chloride (PVC)	Silver nanoparticles	Fresh chicken	<i>Campylobacter</i> spp., <i>S. aureus</i> [113]

to bacterial death [119]. The release kinetics can be adjusted to prolong antimicrobial activity, as demonstrated by chitosan and polyethylene coatings, which maintain activity for over 30 days against pathogens like *E. coli* and *S. aureus* [120].

4.2. Contact-active mechanisms

Contact-active coatings kill microbes directly upon contact, offering immediate antimicrobial effects [121]. These coatings act through the surface properties like charge, topography, and antimicrobial functional groups to disrupt microbial cells [122]. For example, quaternary ammonium compounds (QACs) and chitosan can damage bacterial membranes. In the same manner, micro/nano-scale features can physically rupture microbial cells [123]. These coatings also prevent biofilm formation, providing immediate protection. Coatings with silver nanoparticles or QACs exhibit both release and contact-active mechanisms [124], enhancing antimicrobial efficacy [125]. These mechanisms are crucial for enhancing food safety and quality by providing sustained or immediate antimicrobial protection [126].

4.3. Biofilm prevention and disruption

Biofilm formation on food contact surfaces is a significant food safety challenge, as it protects harmful microbes from cleaning and sanitizing processes [127]. Biofilm-preventing and disrupting antimicrobial coatings are essential for minimizing contamination risks [128]. These coatings prevent microbial adhesion and actively disrupt existing biofilms, ensuring cleaner and safer surfaces in food environments [129].

4.3.1. Mechanisms of biofilm prevention

Anti-adhesive surface properties: Hydrophobic coatings, like PTFE, reduce microbial attachment by minimizing surface contact [130].

Incorporation of antimicrobial agents: Coatings with antimicrobial agents, such as silver ions or essential oils, kill microbes and prevent biofilm formation [131].

Surface topography manipulation: Micro/nanostructured surfaces hinder microbial attachment by physically disrupting adhesion points [132].

Electrostatic repulsion: Charged coatings repel microbial cells with a similar charge, preventing initial adhesion [133].

4.3.2. Mechanisms of biofilm disruption

Enzymatic degradation: Enzyme-infused coatings break down the biofilm's EPS matrix, thus facilitating its removal [134].

Release of reactive oxygen species (ROS): ROS damage microbial cells in biofilms, weakening the structure for its easier removal [135].

Interruption of quorum sensing: Coatings that block bacterial communication prevent biofilm maturation [136].

Mechanical disruption: Micro-textured surfaces can fragment biofilm structures with minimal mechanical force [137].

4.3.3 Examples of biofilm-preventing and disrupting coatings

Silver-embedded coatings: Silver ions prevent microbial adhesion and degrade biofilms, effective against pathogens like *Listeria* spp. and *E. coli* [138].

Essential oil-based coatings: Natural oils like thymol and eugenol prevent and disrupt formation of biofilms, offering a food-safe option [139].

Chitosan and quaternary ammonium surfaces: Chitosan's positive charge and quaternary ammonium compounds effectively prevent adhesion and disrupt biofilms [140].

Biofilm prevention and disruption mechanisms are key aspects of antimicrobial polymeric coatings in the food industry, providing enhanced protection for food contact surfaces through physical and chemical deterrents to microbial adhesion and biofilm formation.

5. Types of antimicrobial agents in polymeric coatings

This section explores antimicrobial agents used in polymeric coatings for food contact surfaces, categorized into metal-based, natural, and synthetic chemicals [141]. Metal-based agents (e. g., silver, copper, zinc oxide) provide strong antimicrobial action and durability [142]. Natural antimicrobials (e. g., essential oils, enzymes) are valued for their biodegradability and health benefits [143], ideal for sustainable applications. Synthetic agents (e. g., quaternary ammonium compounds) are effective but yet raise concerns about their toxicity and environmental impact [144].

5.1. Metal-based agents in antimicrobial polymeric coatings

Metal-based agents, commonly used in nanoparticle form, offer broad-spectrum antimicrobial activity against bacteria, fungi, and viruses [145]. These agents, including silver, copper, and zinc oxide, disrupt microbial growth through their particular mechanisms, enhancing the hygiene of food contact surfaces [146].

5.1.1. Silver-based agents

Silver nanoparticles (AgNPs) are incorporated into polymer coatings to maximize surface area. Silver ions (Ag⁺) disrupt cellular processes, causing cell death through oxidative stress and interference with DNA replication [147].

Applications: Used in food processing equipment and packaging to reduce growth of pathogens like *E. coli*, *Salmonella* spp., and *Listeria* spp. [148].

5.1.2. Copper-based agents

Copper, often in nanoparticle form, is an effective antimicrobial agent. Copper ions disrupt microbial cell membranes, generate reactive oxygen species (ROS), and inhibit biofilm formation [149].

Applications: Used on food preparation surfaces and high-touch areas to prevent microbial colonization, effective against *E. coli* and *Staphylococcus aureus* [150].

5.1.3. Zinc oxide (ZnO) nanoparticles

ZnO nanoparticles exhibit antimicrobial properties through ROS generation and disruption of microbial enzymes, making it effective against a wide range of microorganisms [151].

Applications: Used in food packaging and production surfaces, effective against *E. coli*, *Staphylococcus aureus*, and *Bacillus subtilis*.

5.1.4. Advantages of metal-based antimicrobial agents

Broad-spectrum activity: Effective against bacteria, fungi, and viruses. Durability: Stable under exposure to various environmental conditions, suitable for long-term use in food processing [152].

Multiple mechanisms: Metal ions target various cellular functions, reducing microbial resistance.

Compatibility: Easily incorporated into different polymers [153].

5.1.5. Complications and considerations

Despite their effectiveness, metal-based agents may leach over time, thus potentially reducing their functional longevity. High metal concentrations can raise safety concerns, especially for food contact applications [154]. Regulatory guidelines are necessary to ensure both efficacy and safety [155].

5.2. Natural antimicrobials

Natural antimicrobial agents, derived from plant extracts [156], essential oils, and enzymes, are popular in polymeric coatings due to their eco-friendly properties [157], low toxicity, and biodegradability. These agents offer broad-spectrum antimicrobial efficacy against foodborne pathogens and can extend food shelf life when incorporated into coatings [144].

5.2.1. Essential oils

Essential oils (EOs) like oregano, thyme, cinnamon, and rosemary are effective against bacteria, fungi, and viruses [158]. Their antimicrobial activity is due to components like thymol and carvacrol, which disrupt microbial cell structures [145].

Mechanism: EOs increase membrane permeability, causing cell leakage and death, and some, like oregano and thyme, also prevent oxidation [146].

Applications: EOs are used in food packaging and edible coatings to protect against pathogens like *Salmonella* spp and *E. coli*, extending the shelf life of meats, produce, and dairy products [147].

5.2.2. Enzymes

Enzymes such as lysozyme, lactoferrin, and nisin are effective antimicrobial agents against Gram-positive bacteria, known for their natural origin and specificity [148].

Mechanism: Lysozyme breaks down bacterial cell walls, lactoferrin inhibits bacterial growth by binding iron, and nisin disrupts cell membranes [149].

Applications: Enzyme-based coatings are used in packaging for meat, cheese, and fresh produce, extending product shelf life [43].

5.2.3. Plant extracts

Plant extracts like garlic, green tea, and cranberry contain antimicrobial bioactive compounds such as phenolic compounds and flavonoids, offering a biodegradable alternative to synthetic antimicrobials [150].

Mechanism: These extracts disrupt cell walls [159], hinder nucleic acid synthesis, and interfere with microbial metabolism [160]. For instance, garlic extract contains allicin, which inhibits bacterial and fungal pathogens [151].

Applications: Plant extracts are used in coatings for fruits, vegetables, seafood, and meats to reduce spoilage and growth of pathogenic bacteria [152].

5.2.4. Advantages of natural antimicrobials

Safety and biodegradability: Generally recognized as safe (GRAS) and eco-friendly.

Multiple mechanisms: Reduces microbial resistance risk.

Consumers' acceptance: Increasing demand for natural ingredients in food.

Synergistic effects: Can be combined with other antimicrobials for enhanced effectiveness.

5.2.5. Complications and limitations

Stability: Volatile compounds like essential oils may lose efficacy over time or under harsh conditions.

Sensory impact: Flavors or odors may be imparted to food, which could be undesirable. [154]

Cost and availability: Extraction and purification are often more expensive and dependent on seasonality.

Variable efficacy: Efficacy can vary based on concentration, formulation, and environmental conditions.

Natural antimicrobials, such as essential oils, enzymes, and plant extracts, offer effective alternatives to synthetic agents in antimicrobial coatings [161]. They protect food safety by disrupting cell membranes, binding nutrients, and interfering with metabolism [162]. However, optimizing their stability, sensory properties, and integration into polymeric matrices is crucial for deploying their full potential in food contact applications [163].

5.3. Synthetic chemical agents

Synthetic chemical agents like Quaternary Ammonium Compounds (QACs) and Triclosan are commonly used in antimicrobial coatings due to their broad-spectrum activity against bacteria, fungi, and viruses [164]. They enhance food safety by preventing contamination on food contact surfaces. These agents offer stability [165], prolonged activity, and effectiveness at low concentrations. However, concerns about environmental impact, microbial resistance, and regulatory restrictions require careful evaluation of their using [166].

5.3.1. Quaternary ammonium compounds (QACs)

QACs, such as benzalkonium chloride, disrupt integrity of microbial cell membranes by binding to negatively charged surfaces, thus causing leakage and cell death. They are effective against various pathogens, including *Staphylococcus aureus* and *Escherichia coli* [167]. QACs create contact-active surfaces that kill microbes on contact without releasing chemicals into the environment. Despite their efficacy, concerns over microbial resistance have led to increased research for alternatives and prevention of microbial resistance development [168].

5.3.2. Triclosan

Triclosan inhibits bacterial fatty acid biosynthesis by blocking the enoyl-acyl carrier protein reductase enzyme. It acts at low concentra-

tions, offering broad-spectrum antimicrobial activity against bacteria and fungi [169]. However, concerns over its environmental persistence, bioaccumulation, and the rise of Triclosan-resistant bacteria have led to regulatory restrictions for its using [170]. As a result, safer and more sustainable alternatives are preferred for food-contact applications [171].

5.3.3. Advantages and limitations of synthetic chemical agents

The key benefits of synthetic agents like QACs and triclosan are their potent, long-lasting antimicrobial activity and effectiveness at low concentrations. However, their potential toxicity, environmental persistence, and risks of resistance development pose necessity for serious trials [172]. Hybrid approaches combining synthetic agents with natural antimicrobials or using encapsulation techniques are being explored to find the way to reduce environmental impact [173]. Despite these limitations, synthetic agents remain crucial in high-hygiene settings, with ongoing research focused on optimizing their use in sustainable antimicrobial solutions [174].

6. Evaluation of antimicrobial efficacy in polymeric coatings

This section covers methods to assess the effectiveness of polymeric coatings in preventing or eliminating microbial contaminants on food contact surfaces [175]. Both laboratory and field testing approaches, such as microbial count reduction and zone of inhibition tests, are essential to ensure coatings meet food safety and preservation performance standards, particularly in food safety. Comparative studies help identify strengths and weaknesses across various coatings and agents.

6.1. Laboratory and field testing methods

Evaluation combines laboratory and field methods to ensure that coatings meet safety standards, maintain efficacy, and perform well in real-world conditions [176].

6.1.1. Laboratory testing methods

Agar diffusion test: Tests antimicrobial action by observing the inhibition zone around a coating on an agar plate.

Colony count method: Measures microbial reduction by counting viable colonies after exposure to a coated surface [177].

Time-kill assay: Evaluates antimicrobial activity over time by counting viable cells at certain intervals.

Biofilm assay: Assesses the coating's ability to prevent or disrupt biofilm formation.

Minimum inhibitory concentration (MIC) testing: Determines the lowest concentration of antimicrobial agent needed to inhibit microbial growth [178].

6.1.2. Field testing methods

Swab testing in food processing environments: Measures microbial load on coated surfaces.

Environmental monitoring: Tracks microbial levels in food production or packaging facilities over time.

Simulated food processing: Tests coatings under real processing conditions, including exposure to temperature, humidity, and food residues.

Sensory analysis: Checks if the coating affects the sensory properties of food products.

Shelf-life testing: Assesses the longevity of antimicrobial coatings and their impact on food preservation [179].

6.1.3. Integrating laboratory and field testing

Combining laboratory tests for optimization with field tests for real-world validation ensures comprehensive evaluation of antimicrobial coatings across diverse conditions [180].

Testing methods, including the zone of inhibition test, microbial count reduction test, MIC test, time-kill assay, biofilm inhibition assay [181], and others, provide insights into coating efficacy, durability, and practical applicability in maintaining food safety and extending shelf-life [182].

Comparative studies are essential for evaluating antimicrobial polymeric coatings, offering insights into the performance of various coating types and antimicrobial agents [183].

7. Key factors affecting antimicrobial performance

The effectiveness of antimicrobial polymeric coatings depends on several factors that influence their performance in real-world applications [184].

7.1. Temperature and humidity

Temperature and humidity significantly impact the stability and efficacy of coatings. High temperatures can enhance antimicrobial release but may also degrade the materials [185]. Excessive humidity can compromise the coating's integrity [186], reduce effectiveness, and promote microbial growth. Optimal temperature and humidity are essential for long-term performance of the coatings in food preservation applications [187].

7.2. Surface characteristics and coating thickness

Surface texture affects microbial adhesion, as smoother surfaces improve antimicrobial efficacy [188]. Coating thickness influences the duration of antimicrobial effects but may alter material properties like flexibility and transparency [189]. The application method also affects coating uniformity and adhesion [190].

7.3. Type of microbial contaminant

The type of microorganism, including bacteria and fungi [191], affects the coating's effectiveness. Gram-positive and gram-negative bacteria give different responses to antimicrobial agents [192], and biofilms can shield microbes, reducing antimicrobial coating efficacy. Tailoring coatings to the microbial profile enhances food safety and reduces foodborne illness risks [193].

8. Hurdles and limitations of antimicrobial polymeric coatings

Antimicrobial polymeric coatings face setbacks in durability [93], health/environmental impact, and cost/practicality for industrial use. Key issues include:

8.1. Durability and longevity of antimicrobial effects

Coatings degrade over time due to the factors like temperature, moisture, UV light, and microbial activity, reducing their antimicrobial efficacy. Degradation mechanisms include hydrolysis, photodegradation, thermal degradation, and microbial breakdown.

Mechanical wear and tear from handling and cleaning can reduce the efficacy of antimicrobial coatings, especially in high-use environments like food processing [71]. Researches are needed to develop more durable coatings that retain antimicrobial properties under harsh conditions [194].

8.2. Health and environmental concerns

The use of synthetic antimicrobials in coatings raises health concerns, such as toxicity and the potential for chemical leaching into food, posing long-term risks. Not to mention, these agents can harm the environment by promoting antimicrobial resistance development and ecological imbalances [195]. Regulatory roadblocks exist, as many countries have strict rules regarding chemical additives in food contact materials.

8.3. Cost and practicality in industrial application

The high cost of developing antimicrobial polymeric coatings, due to advanced materials and production methods, is a major barrier to their widespread adoption in the food industry. Small and medium-sized en-

terprises (SMEs) may struggle to invest in these technologies, limiting competition [196]. To boot, drawbacks like compatibility with existing processes, scalability, and the need for specialized equipment complicate industrial application. Manufacturers must weigh the cost-effectiveness of these coatings against their benefits in food safety and shelf life. Ongoing researches are needed to create affordable, scalable, and user-friendly solutions for easy integration into food processing systems [197]. To fully realize the potential of these coatings, it is essential to address durability, health and environmental concerns, and cost-effectiveness.

9. Conclusion

This review highlights the critical role of antimicrobial polymeric coatings in enhancing food safety and preventing microbial contamination on food contact surfaces. Both natural biopolymer coatings, such as chitosan and alginate, and synthetic polymers like polyethylene and polypropylene, demonstrate significant antimicrobial efficacy. However, stumbling blocks such as coating durability, health safety and environmental concerns related to synthetic agents, and cost-effectiveness remain. Future research should prioritize the development of biodegradable and environmentally friendly polymers to reduce ecological impact and address regulatory concerns about synthetic antimicrobial agents. Incorporating natural antimicrobials, such as essential oils or plant extracts, into the coatings would offer safer, more sustainable alternatives. On top of that, research into hybrid and composite coatings, which combine the benefits of both natural and synthetic materials, would enhance antimicrobial performance and longevity, providing resistance to environmental factors like temperature fluctuations, moisture, and UV light. Exploring nanotechnology-based coatings and the synergy between antimicrobial coatings and other food preservation technologies, like modified atmosphere packaging, offers promising solutions for improving food safety and extending shelf life. Confronting scalability and cost-effectiveness through more affordable manufacturing processes is essential for widespread adoption in the food industry. Long-term studies on the safety and regulatory compliance of these coatings will ensure their safe use, and cooperation with regulatory bodies will help establish guidelines to meet safety standards. Continued researches, innovations, and interdisciplinary collaboration will be essential for overcoming current limitations and advancing antimicrobial coatings, ultimately contributing to safer food systems, improved public health, and more sustainable practices in food industries.

REFERENCES

- Sukhareva, K., Chernetsov, V., Burmistrov, I. (2024). A review of antimicrobial polymer coatings on steel for the food processing industry. *Polymers*, 16(6), Article 809. <https://doi.org/10.3390/polym16060809>
- Abang, S., Wong, F., Sarbatly, R., Sariau, J., Bains, N. A. (2023). Bioplastic classifications and innovations in antibacterial, antifungal, and antioxidant applications. *Journal of Bioresources and Bioproducts*, 8(4), 361–387. <https://doi.org/10.1016/j.jobab.2023.06.005>
- Mohammad, Z. H., Ahmad, F. (2024). Nanocoating and its application as antimicrobials in the food industry: A review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 254, Article 127906. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.127906>
- Al-Maharma, A., Al-Hunaiti, N. (2019). Critical review of the parameters affecting the effectiveness of moisture absorption treatments used for natural composites. *Journal of Composites Science*, 3(1), Article 27. <https://doi.org/10.3390/jcs3010027>
- Alkarrar, S., Bin Saad, H., Soliman, M. (2024). On antimicrobial polymers: Development, mechanism of action, international testing procedures, and applications. *Polymers*, 16, Article 771. <https://doi.org/10.3390/polym16060771>
- Michel, M., Eldridge, A. L., Hartmann, C., Klassen, P., Ingram, J., Meijer, G. W. (2024). Benefits and challenges of food processing in the context of food systems, value chains and sustainable development goals. *Trends in Food Science and Technology*, 153, Article 104703. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2024.104703>
- Alirezalu, K., Yaghoubi, M., Poorsharif, L., Aminnia, S., Kahve, H. I., Pateiro, M. et al. (2021). Antimicrobial polyamide-alginate casing incorporated with nisin and ϵ -polyllysine nanoparticles combined with plant extract for inactivation of selected bacteria in nitrite-free Frankfurter-type sausage. *Foods*, 10(5), Article 1003. <https://doi.org/10.3390/foods10051003>
- Amrhar, R., Singh, J., Eesaee, M., Carrière, P., Saidi, A., Nguyen-Tri, P. (2025). Polymeric nanocomposites-based advanced coatings for antimicrobial and antiviral applications: A comprehensive overview. *Results in Surfaces and Interfaces*, 19, Article 100497. <https://doi.org/10.1016/j.rsufi.2025.100497>
- Visan, A. I., Negut, I. (2024). Coatings based on essential oils for combating antibiotic resistance. *Antibiotics*, 13(7), Article 625. <https://doi.org/10.3390/antibiotics13070625>
- Olawore, O., Ogunmola, M., Desai, S. (2024). Engineered nanomaterial coatings for food packaging: Design, manufacturing, regulatory, and sustainability implications. *Micromachines*, 15(2), Article 245. <https://doi.org/10.3390/mi15020245>
- Pakdel, M., Olsen, A., Bar, E. M. S. (2023). A review of food contaminants and their pathways within food processing facilities using open food processing equipment. *Journal of Food Protection*, 86(12), Article 100184. <https://doi.org/10.1016/j.jfp.2023.100184>
- Yang, X., Narvaez-Bravo, C., Zhang, P. (2024). Driving forces shaping the microbial ecology in meat packing plants. *Frontiers in Microbiology*, 14, Article 1333696. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1333696>
- Azamatov, B., Dzhes, A., Borisov, A., Kaliyev, D., Maratuly, B., Sagidugumar, A. et al. (2025). Antibacterial properties of copper-tantalum thin films: The impact of copper content and thermal treatment on implant coatings. *Heliyon*, 11(1), Article e41130. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e41130>
- Onyeaka, H., Ghosh, S., Obileke, K., Miri, T., Odeyemi, O. A., Nwaiwu, O. et al. (2024). Preventing chemical contaminants in food: Challenges and prospects for safe and sustainable food production. *Food Control*, 155, Article 110040. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2023.110040>
- Tohonon, A. C., Ouétchéhou, R., Hounsou, M., Zannou, O., Dabadé, D. S. (2025). Food hygiene in Sub-Saharan Africa: A focus on catering services. *Food Control*, 168, Article 110938. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2024.110938>
- Babaei-Ghazvini, A., Acharya, B., Korber, D. R. (2021). Antimicrobial biodegradable food packaging based on chitosan and metal/metal-oxide bio-nanocomposites: A review. *Polymers*, 13(16), Article 2790. <https://doi.org/10.3390/polym13162790>
- Barik, M., BhagyaRaj, G. V. S., Dash, K. K., Shams, R. (2024). A thorough evaluation of chitosan-based packaging film and coating for food product shelf-life extension. *Journal of Agriculture and Food Research*, 16, Article 101164. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2024.101164>
- Liu, X., Yao, H., Zhao, X., Ge, C. (2023). Biofilm formation and control of foodborne pathogenic bacteria. *Molecules*, 28(6), Article 2432. <https://doi.org/10.3390/molecules28062432>
- Birkett, M., Dover, L., Cherian Lukose, C., Wasy Zia, A., Tambuwala, M. M., Serrano-Aroca, A. (2022). Recent advances in metal-based antimicrobial coatings for high-touch surfaces. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(3), Article 1162. <https://doi.org/10.3390/ijms23031162>
- Negut, I., Albu, C., Bita, B. (2024). Advances in antimicrobial coatings for preventing infections of head-related implantable medical devices. *Coatings*, 14(3), Article 256. <https://doi.org/10.3390/coatings14030256>
- Dey, S., Nagababu, B. H. (2022). Applications of food color and bio-preservatives in the food and its effect on the human health. *Food Chemistry Advances*, 1, Article 100019. <https://doi.org/10.1016/j.focha.2022.100019>
- Barshutina, M., Yakubovsky, D., Arsenin, A., Volkov, V., Barshutin, S., Vladimirova, A. et al. (2025). Biomimetic silicone surfaces for antibacterial applications. *Polymers*, 17(2), Article 213. <https://doi.org/10.3390/polym17020213>
- Kalajahi, S. T., Misra, A., Koerd, A. (2024). Nanotechnology to mitigate microbiologically influenced corrosion (MIC). *Frontiers in Nanotechnology*, 6, Article 1340352. <https://doi.org/10.3389/fnano.2024.1340352>

24. de Carvalho, T.B., Barbosa, J. B., Teixeira, P. (2023). Effectiveness and durability of a quaternary ammonium compounds-based surface coating to reduce surface contamination. *Biology*, 12(5), Article 669. <https://doi.org/10.3390/biology12050669>
25. Bizymis, A.-P., Kalantzi, S., Mamma, D., Tzia, C. (2023). Addition of silver nanoparticles to composite edible films and coatings to enhance their antimicrobial activity and application to cherry preservation. *Foods*, 12(23), Article 4295. <https://doi.org/10.3390/foods12234295>
26. Bromberg, L., Magariños, B., Concheiro, A., Hatton, T. A., Alvarez-Lorenzo, C. (2024). Nonleaching biocidal N-Halamine-Functionalized polyamine-, guanidine-, and hydantoin-based coatings. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 63(14), 6268–6278. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.4c00320>
27. da Cruz Nizer, W. S., Adams, M. E., Allison, K. N., Montgomery, M. C., Mosher, H., Cassol, E. et al. (2024). Oxidative stress responses in biofilms. *Biofilm*, 7, Article 100203. <https://doi.org/10.1016/j.biofilm.2024.100203>
28. Song, Q., Xiao, Z., Gao, H., Chen, X., Wang, K., Zhao, R. et al. (2024). Antimicrobial polymeric coatings synthesized by solvent-free initiated Chemical Vapor Deposition: A review. *Chemical Engineering Journal*, 494, Article 152287. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.152287>
29. Zarrintaj, P., Seidi, F., Youssefi Azarfam, M., Khodadadi Yazdi, M., Erfani, A., Barani, M. et al. (2023). Biopolymer-based composites for tissue engineering applications: A basis for future opportunities. *Composites Part B: Engineering*, 258, Article 110701. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2023.110701>
30. Ueda, J. M., Morales, P., Fernández-Ruiz, V., Ferreira, A., Barros, L., Caroch, M. et al. (2023). Powdered foods: Structure, processing, and challenges: A review. *Applied Sciences*, 13(22), Article 12496. <https://doi.org/10.3390/app132212496>
31. Duda-Chodak, A., Tarko, A., Petka-Poniatowska, K. (2023). Antimicrobial Compounds in Food Packaging. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(3), Article 2457. <https://doi.org/10.3390/ijms24032457>
32. Satchanska, G., Davidova, S., Petrov, P. D. (2024). Natural and synthetic polymers for biomedical and environmental applications. *Polymers*, 16(8), Article 1159. <https://doi.org/10.3390/polym16081159>
33. Kalpana Manivannan, R., Sharma, N., Kumar, V., Jayaraj, I., Vimal, S., Umesh, M. (2024). A comprehensive review on natural macromolecular biopolymers for biomedical applications: Recent advancements, current challenges, and future outlooks. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*, 8, Article 100536. <https://doi.org/10.1016/j.carpta.2024.100536>
34. Jahangiri, F., Mohanty, A. K., Misra, M. (2024). Sustainable biodegradable coatings for food packaging: Challenges and opportunities. *Green Chemistry*, 26(9), 4934–4974. <https://doi.org/10.1039/D3GC02647G>
35. Nasaj, M., Chehelgerdi, M., Asghari, B., Ahmadih-Yazdi, A., Asgari, M., Kabiri-Samani, S. et al. (2024). Factors influencing the antimicrobial mechanism of chitosan action and its derivatives: A review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 277, Article 134321. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.134321>
36. Bucataru, C., Ciobanasi, C. (2024). Antimicrobial peptides: Opportunities and challenges in overcoming resistance. *Microbiological Research*, 286, Article 127822. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2024.127822>
37. Elashnikov, R., Ulbrich, P., Vokatá, B., Pavličková, V. S., Švorčík, V., Lyutakov, O. et al. (2021). Physically switchable antimicrobial surfaces and coatings: General concept and recent achievements. *Nanomaterials*, 11(11), Article 3083. <https://doi.org/10.3390/nano11113083>
38. Yan, X., Meng, F., Wigati, L. P., Yan, T. T., Phuon, N. T. H., Koga, A. et al. (2024). Improvement of cross-linked films based on chitosan/diepoxy-poly (ethylene glycol) incorporating trans-cinnamaldehyde essential oil: Preparation, properties, and application in banana storage. *International Journal of Biological Macromolecules*, 263, Article 130299. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.130299>
39. Mostolizadeh, S. (2024). Alginate, Polymer Purified from Seaweed. Chapter in a book: *Alginate – Applications and Future Perspectives*. IntechOpen, 2024. <https://doi.org/10.5772/intechopen.112666>
40. Wathoni, N., Suhandi, C., Ghassani Purnama, M., Mutmainnah, A., Nurbaniyah, N., Syaifa, D. et al. (2024). Alginate and chitosan-based hydrogel enhance antibacterial agent activity on topical application. *Infection and Drug Resistance*, 17, 791–805. <https://doi.org/10.2147/IDR.S456403>
41. Fadiji, T., Rashvand, M., Daramola, M. O., Iwarere, S. A. (2023). A review on Antimicrobial packaging for extending the shelf life of food. *Processes*, 11(2), Article 590. <https://doi.org/10.3390/pr11020590>
42. Andriani, V., Abyor Handayani, N. (2023). Recent technology of edible coating production: A review. *Materials Today: Proceedings*, 87, 200–206. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.02.397>
43. Lai, J., Azad, A. K., Sulaiman, W. M. A. W., Kumarasamy, V., Subramanian, V., Alshehade, S. A. (2024). Alginate-based encapsulation fabrication technique for drug delivery: An updated review of particle type, formulation technique, pharmaceutical ingredient, and targeted delivery system. *Pharmaceutics*, 16(3), Article 370. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics16030370>
44. Cen, S., Fang, Q., Tong, L., Yang, W., Zhang, J., Lou, Q. et al. (2021). Effects of chitosan-sodium alginate-nisin preservatives on the quality and spoilage microbiota of *Penaeus vannamei* shrimp during cold storage. *International Journal of Food Microbiology*, 349, Article 109227. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2021.109227>
45. Ahmad, M. I., Li, Y., Pan, J., Liu, F., Dai, H., Fu, Y. et al. (2024). Collagen and gelatin: Structure, properties, and applications in food industry. *International Journal of Biological Macromolecules*, 254, Article 128037. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.128037>
46. El-Sayed, S. M., Youssef, A. M. (2024). Emergence of cheese packaging by edible coatings for enhancing its shelf-life. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 18(7), 5265–5280. <https://doi.org/10.1007/s11694-024-02564-0>
47. Rather, J. A., Kaur, G., Shah, I. A., Majid, D., Makroo, H. A., Dar, B. N. (2024). Sustainable gelatin-based packaging with nanoemulsified chilli seed oil for enhancing poultry meat preservation: An eco-friendly approach. *Food Chemistry Advances*, 5, Article 100761. <https://doi.org/10.1016/j.focha.2024.100761>
48. Gabrić, D., Kurek, M., Šćetar, M., Brnčić, M., Galić, K. (2022). Effect of non-thermal food processing techniques on selected packaging materials. *Polymers*, 14(23), Article 5069. <https://doi.org/10.3390/polym14235069>
49. Szadkowski, B., Śliwka-Kaszyńska, M., Marzec, A. (2024). Bioactive and biodegradable cotton fabrics produced via synergic effect of plant extracts and essential oils in chitosan coating system. *Scientific Reports*, 14, Article 8530. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-59105-4>
50. Vanaraj, R., Suresh Kumar, S. M., Mayakrishnan, G., Rathinam, B., Kim, S. C. (2024). A current trend in efficient biopolymer coatings for edible fruits to enhance shelf life. *Polymers*, 16(18), Article 2639. <https://doi.org/10.3390/polym16182639>
51. Fernández-Cancelo, P., Giné-Bordonaba, J., Pérez-Gago, M. B., Palou, L., Torres, R., Echeverria, G. et al. (2024). A hydroxypropyl methylcellulose (HPMC)-based coating inhibits ethylene-dependent quality changes and reduces superficial scald incidence and blue mould severity during postharvest handling of two apple varieties. *Postharvest Biology and Technology*, 207, Article 112610. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2023.112610>
52. Hahn, S., Hennecke, D. (2023). What can we learn from biodegradation of natural polymers for regulation? *Environmental Sciences Europe*, 35(1), Article 50. <https://doi.org/10.1186/s12302-023-00755-y>
53. Schneider, G., Steinbach, A., Putics, Á., Solti-Hodován, Á., Palkovics, T. (2023). Potential of essential oils in the control of listeria monocytogenes. *Microorganisms*, 11(6), Article 1364. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11061364>
54. Rob, Md. M., Pappu, Md. M. H., Arifin, Md. S., Era, T. N., Akhi, M. Z., Bhattacharya, D. K. et al. (2024). Application and evaluation of plant-based edible active coatings to enhance the shelf-life and quality attributes of Jara lebu (Citrus medica). *Discover Food*, 4, Article 26. <https://doi.org/10.1007/s44187-024-00094-8>
55. Kumar, A., Yadav, S., Pramanik, J., Sivamaruthi, B. S., Jayeoye, T. J., Prajapati, B. G. et al. (2023). Chitosan-based composites: Development and perspective in food preservation and biomedical applications. *Polymers*, 15(15), Article 3150. <https://doi.org/10.3390/polym15153150>
56. Metha, C., Pawar, S., Suvama, V. (2024). Recent advancements in alginate-based films for active food packaging applications. *Sustainable Food Technology*, 2(5), 1246–1265. <https://doi.org/10.1039/D3FB00216K>
57. Gaidau, C., Răpă, M., Stanca, M., Tanase, M.-L., Olariu, L., Constantinescu, R. R. et al. (2023). Fish scale gelatin nanofibers with helichrysum italicum and lavender latifolia essential oils for bioactive wound-healing dressings. *Pharmaceutics*, 15(12), Article 2692. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics15122692>
58. Vermelho, A. B., Moreira, J. V., Junior, A. N., da Silva, C. R., Cardoso, V. da S., Akamine, I. T. (2024). Microbial preservation and contamination control in the baking industry. *Fermentation*, 10(5), Article 231. <https://doi.org/10.3390/fermentation10050231>
59. Upadhyay, P., Zubair, M., Roopesh, M. S., Ullah, A. (2024). An overview of advanced antimicrobial food packaging: Emphasizing antimicrobial agents and polymer-based films. *Polymers*, 16(14), Article 2007. <https://doi.org/10.3390/polym16142007>
60. Cheng, C., Chen, S., Su, J., Zhu, M., Zhou, M., Chen, T. et al. (2022). Recent advances in carrageenan-based films for food packaging applications. *Frontiers in Nutrition*, 9, Article 1004588. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.1004588>
61. Fukala, I., Kučera, I. (2024). Natural polyhydroxyalkanoates — An overview of bacterial production methods. *Molecules*, 29(10), Article 2293. <https://doi.org/10.3390/molecules29102293>
62. Vadalá, R., De Maria, L., De Pasquale, R., Di Salvo, E., Lo Vecchio, G., Di Bella, G. et al. (2024). Development of a chitosan-based film from shellfish waste for the preservation of various cheese types during storage. *Foods*, 13(13), Article 2055. <https://doi.org/10.3390/foods13132055>
63. Santativongchai, P., Tulayakul, P., Jeon, B. (2023). Enhancement of the antibi-
folic activity of nisin against listeria monocytogenes using food plant extracts. *Pathogens*, 12(3), Article 444. <https://doi.org/10.3390/pathogens12030444>
64. Shankar, S., Mohanty, A. K., DeEll, J. R., Carter, K., Lenz, R., Misra, M. et al. (2024). Advances in antimicrobial techniques to reduce postharvest loss of fresh fruit by microbial reduction. *Npj Sustainable Agriculture*, 2(1), Article 25. <https://doi.org/10.1038/s44264-024-00029-x>
65. Liñán-Atero, R., Aghababaei, F., García, S. R., Hasiri, Z., Ziogkas, D., Moreno, A. et al. (2024). Clove essential oil: Chemical profile, biological activities, encapsulation strategies, and food applications. *Antioxidants*, 13(4), Article 488. <https://doi.org/10.3390/antiox13040488>
66. Bento de Carvalho, T., Silva, B. N., Tomé, E., Teixeira, P. (2024). Preventing fungal spoilage from raw materials to final product: Innovative preservation techniques for fruit fillings. *Foods*, 13(17), Article 2669. <https://doi.org/10.3390/foods13172669>
67. Kurek, M., Pišonić, P., Šćetar, M., Jančić, T., Čanak, I., Vidiček Filipić, S. et al. (2024). Edible coatings for fish preservation: Literature data on storage temperature, product requirements, antioxidant activity, and coating performance — A review. *Antioxidants*, 13(11), Article 1417. <https://doi.org/10.3390/antiox13111417>
68. Hakeem, M. J., Lu, X. (2021). Survival and control of campylobacter in poultry production environment. *Frontiers in Cellular and Infection Microbiology*, 10, Article 615049. <https://doi.org/10.3389/fcimb.2020.615049>
69. Husak, Y., Ma, J., Wala-Kapica, M., Leśniak, K., Babilas, D., Blacha-Grzechnik, A. et al. (2024). Antibacterial coatings on magnesium formed via plasma electrolytic oxidation in CuO suspension. *Materials Chemistry and Physics*, 323, Article 129627. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2024.129627>
70. Riolo, M., Villena, A. M., Calpe, J., Luz, C., Meca, G., Tuccitto, N. et al. (2024). A circular economy approach: A new formulation based on a lemon peel medium activated with lactobacilli for sustainable control of post-harvest fungal rots in fresh citrus fruit. *Biological Control*, 189, Article 105443. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2024.105443>
71. Edo, G. I., Mafe, A. N., Ali, A. B. M., Akpogheli, P. O., Yousif, E., Apameio, J. I. et al. (2025). Chitosan and its derivatives: A novel approach to gut microbiota modulation and immune system enhancement. *International Journal of Biological Macromolecules*, 289, Article 138633. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.138633>
72. Kaur, R., Pathak, L., Vyas, P. (2024). Biobased polymers of plant and microbial origin and their applications — A review. *Biotechnology for Sustainable Materials*, 1(1), Article 13. <https://doi.org/10.1186/s44316-024-00014-x>
73. Jogaiah, S., Mujtaba, A. G., Mujtaba, M., Archana, De Britto, S., Geetha, N. et al. (2025). Chitosan-metal and metal oxide nanocomposites for active and intelligent food Packaging: A comprehensive review of emerging trends and

- associated challenges. *Carbohydrate Polymers*, 357, Article 123459. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2025.123459>
74. Kocić-Tanackov, S., Pavlović, H. (2023). Natural antimicrobial agents utilized in food preservation. *Foods*, 12(18), Article 3484. <https://doi.org/10.3390/foods12183484>
75. Karnwal, A., Kumar, G., Singh, R., Selvaraj, M., Malik, T., Al Tawaha, A. R. M. (2025). Natural biopolymers in edible coatings: Applications in food preservation. *Food Chemistry: X*, 25, Article 102171. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2025.102171>
76. Gabrić, D., Kurek, M., Šćetar, M., Brnčić, M., Galić, K. (2023). Characterization of synthetic polymer coated with biopolymer layer with natural orange peel extract aimed for food packaging. *Polymers*, 15(11), Article 2569. <https://doi.org/10.3390/polym15112569>
77. 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>
78. Mohanan, N., Montazer, Z., Sharma, P. K., Levin, D. B. (2020). Microbial and enzymatic degradation of synthetic plastics. *Frontiers in Microbiology*, 11, Article 580709. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.580709>
79. Burelo, M., Hernández-Varela, J. D., Medina, D. I., Treviño-Quintanilla, C. D. (2023). Recent developments in bio-based polyethylene: Degradation studies, waste management and recycling. *Heliyon*, 9(11), Article e21374. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e21374>
80. Tan, C., Han, F., Zhang, S., Li, P., Shang, N. (2021). Novel bio-based materials and applications in antimicrobial food packaging: Recent advances and future trends. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(18), Article 9663. <https://doi.org/10.3390/ijms22189663>
81. Kim, D.-Y., Patel, S. K. S., Rasool, K., Lone, N., Bhatia, S. K., Seth, C. S. et al. (2024). Bioinspired silver nanoparticle-based nanocomposites for effective control of plant pathogens: A review. *Science of The Total Environment*, 908, Article 168318. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168318>
82. Barretto, R., Qi, G., Jones, C., Li, Y., Sun, X. S., Wang, D. (2024). Bio-based disposable containers for food services. *Advances in Polymer Technology*, 2024, 1–20. <https://doi.org/10.1155/2024/5536535>
83. González-López, M. E., Calva-Estrada, S. de J., Gradilla-Hernández, M. S., Barajas-Álvarez, P. (2023). Current trends in biopolymers for food packaging: A review. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 7, Article 1225371. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2023.1225371>
84. Gil, M., Rudy, M. (2023). Innovations in the packaging of meat and meat products—a review. *Coatings*, 13(2), Article 333. <https://doi.org/10.3390/coatings13020333>
85. Fadji, T., Rashvand, M., Daramola, M. O., Iwarere, S. A. (2023). A review on antimicrobial packaging for extending the shelf life of food. *Processes*, 11(2), Article 590. <https://doi.org/10.3390/pr11020590>
86. Yang, W., Li, J., Yao, Z., Li, M. (2024). A review on the alternatives to antibiotics and the treatment of antibiotic pollution: Current development and future prospects. *Science of The Total Environment*, 926, Article 171757. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171757>
87. Muñoz-Tebar, N., Pérez-Álvarez, J. A., Fernández-López, J., Viuda-Martos, M. (2023). Chitosan edible films and coatings with added bioactive compounds: Antibacterial and antioxidant properties and their application to food products: A review. *Polymers*, 15, Article 396. <https://doi.org/10.3390/polym15020396>
88. Tan, L. F., Yap, V. L., Rajagopal, M., Wiart, C., Selvaraja, M., Leong, M. Y. et al. (2022). Plant as an alternative source of antifungals against aspergillus infections: A review. *Plants*, 11, Article 3009. <https://doi.org/10.3390/plants11223009>
89. Kocira, A., Kozłowski, K., Panasiuk, K., Staniak, M., Szpunar-Krok, E., Hortyńska, P. (2021). Polysaccharides as edible films and coatings: Characteristics and influence on fruit and vegetable quality — A review. *Agronomy*, 11(5), Article 813. <https://doi.org/10.3390/agronomy11050813>
90. Kumari, S., Debbarma, R., Nasrin, N., Khan, T., Taj, S., Bhuyan, T. (2024). Recent advances in packaging materials for food products. *Food Bioengineering*, 3(2), 236–249. <https://doi.org/10.1002/fbe.2.12096>
91. Pinto, L., Bonifacio, M. A., De Giglio, E., Santovito, E., Cometa, S., Bevilacqua, A. et al. (2021). Biopolymer hybrid materials: Development, characterization, and food packaging applications. *Food Packaging and Shelf Life*, 28, Article 100676. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2021.100676>
92. Barik, M., BhagyaRaj, G. V. S., Dash, K. K., Shams, R. (2024). A thorough evaluation of chitosan-based packaging film and coating for food product shelf-life extension. *Journal of Agriculture and Food Research*, 16, Article 101164. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2024.101164>
93. Lewandowski, K., Skórczewska, K. (2022). A brief review of Poly(Vinyl Chloride) (PVC) recycling. *Polymers*, 14(15), Article 3035. <https://doi.org/10.3390/polym14153035>
94. Saberi Riseh, R., Vatankhah, M., Hassanisaadi, M., Kennedy, J. F. (2023). Chitosan-based nanocomposites as coatings and packaging materials for the post-harvest improvement of agricultural product: A review. *Carbohydrate Polymers*, 309, Article 120666. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2023.120666>
95. Liu, Y., Xu, W. Z., Charpentier, P. A. (2020). Synthesis of VO2/Polym(MMA-co-DMEMABr) antimicrobial/thermochromic dual-functional coatings. *Progress in Organic Coatings*, 142, Article 105589. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2020.105589>
96. Naser, A. Z., Deiab, I., Defersha, F., Yang, S. (2021). Expanding poly(lactic acid) (PLA) and polyhydroxyalkanoates (PHAs) applications: A review on modifications and effects. *Polymers*, 13(23), Article 4271. <https://doi.org/10.3390/polym13234271>
97. Shiva, K., Soleimani, A., Morshed, J., Farahmandghavi, F., Shokrolahi, F. et al. (2024). Improving the antibacterial properties of polyethylene food packaging films with Ajwain essential oil adsorbed on chitosan particles. *Scientific Reports*, 14(1), Article 28802. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-80349-7>
98. Zeng, L., Fan, A., Yang, G., Nong, Y., Lu, Y., Yang, R. et al. (2024). Nisin and ε-polylysine combined treatment enhances quality of fresh-cut jackfruit at refrigerated storage. *Frontiers in Nutrition*, 11, Article 1299810. <https://doi.org/10.3389/fnut.2024.1299810>
99. Said, N. S., Sarbon, N. M. (2022). Physical and mechanical characteristics of gelatin-based films as a potential food packaging material: A review. *Membranes*, 12(5), Article 442. <https://doi.org/10.3390/membranes12050442>
100. Hussain, S., Akhter, R., Maktedar, S. S. (2024). Advancements in sustainable food packaging: From eco-friendly materials to innovative technologies. *Sustainable Food Technology*, 2(5), 1297–1364. <https://doi.org/10.1039/D4FB00084F>
101. Mohammed, M., Jawad, A. J. M., Mohammed, A. M., Olewi, J. K., Adam, T., Osman, A. F. et al. (2023). Challenges and advancement in water absorption of natural fiber-reinforced polymer composites. *Polymer Testing*, 124, Article 108083. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2023.108083>
102. Rezić, I., Somogyi Škoc, M. (2024). Computational methodologies in synthesis, preparation and application of antimicrobial polymers, biomolecules, and nanocomposites. *Polymers*, 16(16), Article 2320. <https://doi.org/10.3390/polym16162320>
103. Mukherjee, C., Varghese, D., Krishna, J. S., Boominathan, T., Rakeshkumar, R., Dineshkumar, S. et al. (2023). Recent advances in biodegradable polymers — properties, applications and future prospects. *European Polymer Journal*, 192, Article 112068. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2023.112068>
104. Jha, S., Akula, B., Enyima, H., Novak, M., Amin, V., Liang, H. (2024). Biodegradable biobased polymers: A Review of the state of the art, challenges, and future directions. *Polymers*, 16(16), Article 2262. <https://doi.org/10.3390/polym16162262>
105. Lieu, M. D., Dang, T. K. T., Nguyen, T. H. (2024). Green synthesized silver nanoparticles, a sustainable approach for fruit and vegetable preservation: An overview. *Food Chemistry: X*, 23, Article 101664. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2024.101664>
106. Sateriale, D., Forgione, G., De Cristofaro, G. A., Pagliuca, C., Colicchio, R., Salvatore, P. et al. (2023). Antibacterial and antibiofilm efficacy of thyme (*Thymus vulgaris* L.) essential oil against foodborne illness pathogens, *Salmonella enterica* subsp. *enterica* Serovar Typhimurium and *Bacillus cereus*. *Antibiotics*, 12(3), Article 485. <https://doi.org/10.3390/antibiotics12030485>
107. Ozuna-Valencia, K. H., Moreno-Vásquez, M. J., Graciano-Verdugo, A. Z., Rodríguez-Félix, F., Robles-García, M. Á., Barreras-Urbina, C. G. et al. (2024). The application of organic and inorganic nanoparticles incorporated in edible coatings and their effect on the physicochemical and microbiological properties of seafood. *Processes*, 12(9), Article 1889. <https://doi.org/10.3390/pr12091889>
108. Li, S., Jiang, Y., Wang, M., Li, R., Dai, J., Yan, J. et al. (2022). 3D printing of essential oil/β-cyclodextrin/popping candy modified atmosphere packaging for strawberry preservation. *Carbohydrate Polymers*, 297, Article 120037. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2022.120037>
109. Dai, J., Sameen, D. E., Zeng, Y., Li, S., Qin, W., Liu, Y. et al. (2022). An overview of tea polyphenols as bioactive agents for food packaging applications. *LWT*, 167, Article 113845. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.113845>
110. Khalid, S., Hassan, S. A., Javadi, H., Zahid, M., Naeem, M., Bhat, Z. F. et al. (2024). Factors responsible for spoilage, drawbacks of conventional packaging, and advanced packaging systems for tomatoes. *Journal of Agriculture and Food Research*, 15, Article 100962. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100962>
111. Isopencu, G., Deleanu, I., Busuioc, C., Oprea, O., Surdu, V.-A., Bacalum, M. et al. (2023). Bacterial cellulose-carboxymethylcellulose composite loaded with turmeric extract for antimicrobial wound dressing applications. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(2), Article 1719. <https://doi.org/10.3390/ijms24021719>
112. Chaudhari, A. K., Das, S., Dwivedi, A., Dubey, N. K. (2023). Application of chitosan and other biopolymers based edible coatings containing essential oils as green and innovative strategy for preservation of perishable food products: A review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 253, Article 127688. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.127688>
113. da Silva, D. J., Gramscianinov, G. B., Jorge, P. Z., Malaquias, V. B., Mori, A. A., Hirata, M. H. et al. (2023). PVC containing silver nanoparticles with antimicrobial properties effective against SARS-CoV-2. *Frontiers in Chemistry*, 11, Article 1083399. <https://doi.org/10.3389/fchem.2023.1083399>
114. Ikkene, D., Eggenberger, O. M., Schoenberger, C.-A., Palivan, C. G. (2023). Engineering antimicrobial surfaces by harnessing polymeric nanoassemblies. *Current Opinion in Colloid and Interface Science*, 66, Article 101706. <https://doi.org/10.1016/j.cocis.2023.101706>
115. Miranda, M., Bai, J., Pilon, L., Torres, R., Casals, C., Solsona, C. et al. (2024). Fundamentals of edible coatings and combination with biocontrol agents: A strategy to improve postharvest fruit preservation. *Foods*, 13(18), Article 2980. <https://doi.org/10.3390/foods13182980>
116. Li, H., Xu, H. (2024). Mechanisms of bacterial resistance to environmental silver and antimicrobial strategies for silver: A review. *Environmental Research*, 248, Article 118513. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.118513>
117. Monika, P., Krishna, R. H., Hussain, Z., Nandhini, K., Pandurangi, S. J., Malek, T. et al. (2025). Antimicrobial hybrid coatings: A review on applications of nano ZnO based materials for biomedical applications. *Biomaterials Advances*, 172, Article 214246. <https://doi.org/10.1016/j.bioadv.2025.214246>
118. Mikhailova, E. O. (2020). Silver nanoparticles: Mechanism of action and probable bio-application. *Journal of Functional Biomaterials*, 11(4), Article 84. <https://doi.org/10.3390/jfb11040084>
119. Mafe, A. N., Büßelberg, D. (2024). Impact of metabolites from foodborne pathogens on cancer. *Foods*, 13(23), Article 3886. <https://doi.org/10.3390/foods13233886>
120. Chen, S.-T., Chien, H.-W., Cheng, C.-Y., Huang, H.-M., Song, T.-Y., Chen, Y.-C. et al. (2021). Drug-release dynamics and antibacterial activities of chitosan/cefazolin coatings on Ti implants. *Progress in Organic Coatings*, 159, Article 106385. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2021.106385>
121. Song, Q., Chan, S. Y., Xiao, Z., Zhao, R., Zhang, Y., Chen, X. et al. (2024). Contact-killing antibacterial mechanisms of polycationic coatings: A review. *Progress in Organic Coatings*, 188, Article 108214. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2024.108214>
122. Georgakopoulos-Soares, I., Papazoglou, E. L., Karmiris-Obratanski, P., Karkalos, N. E., Markopoulos, A. P. (2023). Surface antibacterial properties enhanced through engineered textures and surface roughness: A review. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 231, Article 115584. <https://doi.org/10.1016/j.col-surf.2023.115584>
123. Lainioti, G. C., Druvri, D. (2024). Designing antibacterial-based quaternary ammonium coatings (surfaces) or films for biomedical applications: Recent advances. *International Journal of Molecular Sciences*, 25(22), Article 12264. <https://doi.org/10.3390/ijms252212264>

124. Edo, G.I., Mafe, A.N., Ali, A.B.M., Akpogheli, P.O., Yousif, E., Apameio, J.I. et al. (2025). Chitosan and its derivatives: A novel approach to gut microbiota modulation and immune system enhancement. *International Journal of Biological Macromolecules*, 289, Article 138633. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.138633>
125. Ferreres, G., Ivanova, K., Ivanov, I., Tzanov, T. (2023). Nanomaterials and coatings for managing antibiotic-resistant biofilms. *Antibiotics*, 12(2), Article 310. <https://doi.org/10.3390/antibiotics12020310>
126. Wu-Wu, J. W. F., Guadamuz-Mayorga, C., Oviedo-Cerdas, D., Zamora, W. J. (2023). Antibiotic resistance and food safety: Perspectives on new technologies and molecules for microbial control in the food industry. *Antibiotics*, 12(3), Article 550. <https://doi.org/10.3390/antibiotics12030550>
127. Ghosh, S., Sarkar, T., Chakraborty, R. (2021). Formation and development of biofilm - an alarming concern in food safety perspectives. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 38, Article 102210. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2021.102210>
128. Yin, W., Xu, S., Wang, Y., Zhang, Y., Chou, S.-H., Galperin, M. Y. et al. (2021). Ways to control harmful biofilms: Prevention, inhibition, and eradication. *Critical Reviews in Microbiology*, 47(1), 57–78. <https://doi.org/10.1080/1040841X.2020.1842325>
129. Fernández-Gómez, P., Muro-Fraguas, I., Múgica-Vidal, R., Sainz-García, A., Sainz-García, E., González-Raurich, M. et al. (2022). Development and characterization of anti-biofilm coatings applied by Non-Equilibrium Atmospheric Plasma on stainless steel. *Food Research International*, 152, Article 109891. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109891>
130. Caykara, T., Fernandes, S., Braga, A., Rodrigues, J., Rodrigues, L. R., Silva, C. J. (2023). Can superhydrophobic PET surfaces prevent bacterial adhesion? *Nanomaterials*, 13(6), Article 1117. <https://doi.org/10.3390/nano13061117>
131. Iaconis, A., De Plano, L. M., Caccamo, A., Franco, D., Conoci, S. (2024). Antibiofilm strategies: A focused review on innovative approaches. *Microorganisms*, 12(4), Article 639. <https://doi.org/10.3390/microorganisms12040639>
132. Le, P. H., Linklater, D. P., Medina, A. A., MacLaughlin, S., Crawford, R. J., Ivanova, E. P. (2024). Impact of multiscale surface topography characteristics on *Candida albicans* biofilm formation: From cell repellence to fungicidal activity. *Acta Biomaterialia*, 177, 20–36. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2024.02.006>
133. Uzoma, P. C., Etim, I.-I. N., Okonkwo, B. O., Olanrele, O. S., Njoku, D. I., Kola-wole, S. K. et al. (2023). Recent design approaches, adhesion mechanisms, and applications of antibacterial surfaces. *Chemical Engineering Journal Advances*, 16, Article 100563. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.100563>
134. Iñiguez-Moreno, M., Gutiérrez-Lomeli, M., Avila-Novoa, M. G. (2021). Removal of mixed-species biofilms developed on food contact surfaces with a mixture of enzymes and chemical agents. *Antibiotics*, 10(8), Article 931. <https://doi.org/10.3390/antibiotics10080931>
135. Alfei, S., Schito, G. C., Schito, A. M., Zuccari, G. (2024). Reactive oxygen species (ROS)-mediated antibacterial oxidative therapies: Available methods to generate ROS and a novel option proposal. *International Journal of Molecular Sciences*, 25(13), Article 7182. <https://doi.org/10.3390/ijms25137182>
136. Mitra, A. (2024). Combatting biofilm-mediated infections in clinical settings by targeting quorum sensing. *The Cell Surface*, 12, Article 100133. <https://doi.org/10.1016/j.tcs.2024.100133>
137. Leulmi Pichot, S., Joisten, H., Grant, A. J., Dieny, B., Cowburn, R. P. (2020). Magneto-mechanically actuated microstructures to efficiently prevent bacterial biofilm formation. *Scientific Reports*, 10(1), Article 15470. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-72406-8>
138. Fontecha-Umana, F., Ríos-Castillo, A. G., Ripolles-Avila, C., Rodríguez-Jerez, J. J. (2020). Antimicrobial activity and prevention of bacterial biofilm formation of silver and zinc oxide nanoparticle-containing polyester surfaces at various concentrations for use. *Foods*, 9(4), Article 442. <https://doi.org/10.3390/foods9040442>
139. Tanasã, F., Nechifor, M., Teacă, C.-A. (2024). Essential oils as alternative green broad-spectrum biocides. *Plants*, 13(23), Article 3442. <https://doi.org/10.3390/plants13233442>
140. Jung, J., Wen, J., Sun, Y. (2019). Amphiphilic quaternary ammonium chitosans self-assemble onto bacterial and fungal biofilms and kill adherent microorganisms. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 174, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2018.10.078>
141. Edo, G.I., Mafe, A.N., Ali, A.B.M., Akpogheli, P.O., Yousif, E., Isoje, E.F. et al. (2025). Green biosynthesis of nanoparticles using plant extracts: Mechanisms, advances, challenges, and applications. *BioNanoScience*, 15, Article 267. <https://doi.org/10.1007/s12668-025-01883-w>
142. Edo, G.I., Mafe, A.N., Ali, A.B.M., Akpogheli, P.O., Yousif, E., Isoje, E.F. et al. (2025). Evaluation of different antimicrobial polymeric coatings for food contact surfaces. *Discover Food*, 5, Article 179. <https://doi.org/10.1007/s44187-025-00487-3>
143. Nwachukwu, S. C., Edo, G. I., Jikah, A. N., Emakpor, O. L., Akpogheli, P. O., Agbo, J. J. et al. (2024). Recent advances in the role of mass spectrometry in the analysis of food: A review. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 18(6), 4272–4287. <https://doi.org/10.1007/s11694-024-02492-z>
144. Bibi, A., Afza, G., Afzal, Z., Farid, M., Sumrra, S. H., Hanif, M. A. et al. (2024). Synthetic vs. natural antimicrobial agents for safer textiles: A comparative review. *RSC Advances*, 14(42), 30688–30706. <https://doi.org/10.1039/D4RA04519I>
145. Jiang, H., Li, L., Li, Z., Chu, X. (2024). Metal-based nanoparticles in antibacterial application in biomedical field: Current development and potential mechanisms. *Biomedical Microdevices*, 26(1), Article 12. <https://doi.org/10.1007/s10544-023-00686-8>
146. Reda, A. T., Park, J. Y., Park, Y. T. (2024). Zinc oxide-based nanomaterials for microbiostatic activities: A review. *Journal of Functional Biomaterials*, 15(4), Article 103. <https://doi.org/10.3390/jfb15040103>
147. Khaldoun, K., Khizar, S., Saidi-Besbes, S., Zine, N., Errachid, A., Elaissari, A. et al. (2024). Synthesis of silver nanoparticles as an antimicrobial mediator. *Journal of Umm Al-Qura University for Applied Sciences*, 11(2), 274–293. <https://doi.org/10.1007/s43994-024-00159-5>
148. Hyla, K., Dusza, I., Skaradzinska, A. (2022). Recent advances in the application of bacteriophages against common foodborne pathogens. *Antibiotics*, 11(11), Article 1536. <https://doi.org/10.3390/antibiotics11111536>
149. Mondal, S. K., Chakraborty, S., Manna, S., Mandal, S. M. (2024). Antimicrobial nanoparticles: Current landscape and future challenges. *Pharmaceutics*, 1(3), 388–402. <https://doi.org/10.1039/D4PM00032C>
150. Dube, E. (2024). Antimicrobial photodynamic therapy: Self-disinfecting surfaces for controlling microbial infections. *Microorganisms*, 12(8), Article 1573. <https://doi.org/10.3390/microorganisms12081573>
151. Huq, Md. A., Apu, Md. A. I., Ashrafudoulla, Md., Rahman, Md. M., Parvez, Md. A. K., Balusamy, S. R. et al. (2023). Bioactive ZnO nanoparticles: Biosynthesis, characterization and potential antimicrobial applications. *Pharmaceutics*, 15(11), Article 2634. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics15112634>
152. Abdelshafy, A. M., Neetoo, H., Al-Asmari, F. (2024). Antimicrobial activity of hydrogen peroxide for application in food safety and COVID-19 mitigation: An updated review. *Journal of Food Protection*, 87(7), Article 100306. <https://doi.org/10.1016/j.jfp.2024.100306>
153. Salmani-Zarchi, H., Mousavi-Sagharchi, S. M. A., Sepahdoost, N., Ranjbar-Jamalabadi, M., Gross, J. D., Jooya, H. et al. (2024). Antimicrobial feature of nanoparticles in the antibiotic resistance era: From mechanism to application. *Advanced Biomedical Research*, 13(1), Article 113. <https://doi.org/10.4103/abr.92.24>
154. Owheruo, J. O., Edo, G. I., Ifesan, B. O., Bolade, M. K., Origbemioye, B. A., Akpogheli, P. O. et al. (2023). Evaluation of nutraceutical property of extruded breakfast cereal produced from blends of malted finger millet (*Eleusine coracana*) and watermelon (*Citrullus lanatus*) seed flour. *Vegetos*, 37(6), 2347–2361. <https://doi.org/10.1007/s42535-023-00728-9>
155. Asiminesei, D.-M., Fertu, D. I., Gavrilescu, M. (2024). Impact of heavy metal pollution in the environment on the metabolic profile of medicinal plants and their therapeutic potential. *Plants*, 13(6), Article 913. <https://doi.org/10.3390/plants13060913>
156. Edo, G. I., Samuel, P. O., Nwachukwu, S. C. (2023). Bioactive compounds and biological activities of tiger nut (*Cyperus esculentus* L.). Chapter in a book: *Bioactive Compounds in the Storage Organs of Plants*. Springer, Cham, 2023. https://doi.org/10.1007/978-3-031-29006-0_34-1
157. Edo, G. I., Yousif, E., Al-Mashhadani, M. H. (2024). Chitosan: An overview of biological activities, derivatives, properties, and current advancements in biomedical applications. *Carbohydrate Research*, 542, Article 109199. <https://doi.org/10.1016/j.carres.2024.109199>
158. Edo, G. I., Onoharigho, F. O., Jikah, A. N., Agbo, J. J. (2024). The ameliorative effect of methanol extract of *Ricinodendron heudelotii* (Baill.) leaves on paracetamol-induced hepatotoxicity in Wistar rats. *Drug and Chemical Toxicology*, 48(1), 98–106. <https://doi.org/10.1080/01480545.2024.2362891>
159. Moses, R. J., Edo, G. I., Jikah, A. N., Agbo, J. J. (2024). Bioactive compounds and biological activities of garlic. *Current Food Science and Technology Reports*, 2(2), 111–120. <https://doi.org/10.1007/s43555-024-00029-5>
160. Edo, G.I., Ndudi, W., Ali, A.B.M., Yousif, E., Jikah, A.N., Isoje, E.F. et al. (2025). Biopolymers: An inclusive review. *Hybrid Advances*, 9, Article 100418. <https://doi.org/10.1016/j.hybadv.2025.100418>
161. Ndudi, W., Edo, G. I., Samuel, P. O., Jikah, A. N., Opiti, R. A., Ainyanbor, I. E. et al. (2024). Traditional fermented foods of Nigeria: Microbiological safety and health benefits. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 18(6), 4246–4271. <https://doi.org/10.1007/s11694-024-02490-1>
162. Farid, N., Waheed, A., Motwani, S. (2023). Synthetic and natural antimicrobials as a control against food borne pathogens: A review. *Heliyon*, 9(6), Article e17021. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e17021>
163. Quinto, E. J., Caro, I., Villalobos-Delgado, L. H., Mateo, J., De-Mateo-Silleras, B., Redondo-Del-Río, M. P. (2019). Food safety through natural antimicrobials. *Antibiotics*, 8(4), Article 208. <https://doi.org/10.3390/antibiotics8040208>
164. Vereshchagin, A. N., Frolov, N. A., Egorova, K. S., Seitkaliyeva, M. M., Ananikov, V. P. (2021). Quaternary ammonium compounds (QACs) and ionic liquids (ILs) as biocides: From simple antiseptics to tunable antimicrobials. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(13), Article 6793. <https://doi.org/10.3390/ijms22136793>
165. Akpogheli, P. O., Edo, G. I., Ali, S. I., Kasar, K. A., Zainulabdeen, K., Mohammed, A. A. et al. (2024). Effect of processing on the microbiological, proximate, antinutritional and mineral profile of selected yellow cassava varieties and sorghum malt as potential raw materials for alcoholic beverage production. *Beverage Plant Research*, 4(1), 0–0. <https://doi.org/10.48130/bpr-0024-0022>
166. Ifedinezi, O. V., Nnaji, N. D., Anumudu, C. K., Ekwueme, C. T., Uhegwu, C. C., Ihenetu, F. C. et al. (2024). Environmental antimicrobial resistance: Implications for food safety and public health. *Antibiotics*, 13(11), Article 1087. <https://doi.org/10.3390/antibiotics13111087>
167. Crnčević, D., Ramić, A., Kastelic, A. R., Odžak, R., Krce, L., Weber, I. et al. (2024). Naturally derived 3-aminoquinuclidine salts as new promising therapeutic agents. *Scientific Reports*, 14(1), Article 26211. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-77647-5>
168. Boyce, J. M. (2023). Quaternary ammonium disinfectants and antiseptics: Tolerance, resistance and potential impact on antibiotic resistance. *Antimicrobial Resistance and Infection Control*, 12(1), Article 32. <https://doi.org/10.1186/s13756-023-01241-z>
169. Hopf, F. S. M., Roth, C. D., de Souza, E. V., Galina, L., Czczot, A. M., Machado, P. et al. (2022). Bacterial enoyl-reductases: The ever-growing list of fads, their mechanisms and inhibition. *Frontiers in Microbiology*, 13, Article 891610. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.891610>
170. Jikah, A. N., Edo, G. I. (2024). Turmeric (*Curcuma longa*): An insight into its food applications, phytochemistry and pharmacological properties. *Vegetos*, 38(3), 845–866. <https://doi.org/10.1007/s42535-024-01038-4>
171. Pozzebon, E. A., Seifert, L. (2023). Emerging environmental health risks associated with the land application of biosolids: A scoping review. *Environmental Health*, 22(1), Article 57. <https://doi.org/10.1186/s12940-023-01008-4>
172. Arnold, W. A., Blum, A., Branyan, J., Bruton, T. A., Carignan, C. C., Cortopassi, G. et al. (2023). Quaternary ammonium compounds: A chemical class of emerging concern. *Environmental Science and Technology*, 57(20), 7645–7665. <https://doi.org/10.1021/acs.est.2c08244>

173. Edo, G. I., Ndudi, W., Makia, R. S., Ainyanbhor, I. E., Yousif, E., Gaaz, T. S. et al. (2024). Beta-glucan: An overview in biological activities, derivatives, properties, modifications and current advancements in food, health and industrial applications. *Process Biochemistry*, 147, 347–370. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2024.09.011>
174. Anand, U., Carpena, M., Kowalska-Górska, M., Garcia-Perez, P., Sunita, K., Bontempi, E. et al. (2022). Safer plant-based nanoparticles for combating antibiotic resistance in bacteria: A comprehensive review on its potential applications, recent advances, and future perspective. *Science of The Total Environment*, 821, Article 153472. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153472>
175. Jikah, A. N., Edo, G. I., Makia, R. S., Yousif, E., Gaaz, T. S., Isoje, E. F. et al. (2024). A review of the therapeutic potential of sulfur compounds in *Allium sativum*. *Measurement: Food*, 15, Article 100195. <https://doi.org/10.1016/j.meafao.2024.100195>
176. Marin-Kuan, M., Pagnotti, V., Patin, A., Moulin, J., Latado, H., Varela, J. et al. (2023). Interlaboratory study to evaluate a testing protocol for the safety of food packaging coatings. *Toxics*, 11(2), Article 156. <https://doi.org/10.3390/toxics11020156>
177. Salam, Md. A., Al-Amin, Md. Y., Pawar, J. S., Akhter, N., Lucy, I. B. (2023). Conventional methods and future trends in antimicrobial susceptibility testing. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 30(3), Article 103582. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2023.103582>
178. Gangwar, R., Salem, M. M., Maurya, V. K., Bekhit, M. M., Singh, N., Amara, A. A. F. et al. (2024). Exploring time-killing and biofilm inhibition potential of bioactive proteins extracted from two varieties of *Pleurotus ostreatus*. *Frontiers in Microbiology*, 15, Article 1456358. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1456358>
179. Rios, D. A. da S., Nakamoto, M. M., Braga, A. R. C., da Silva, E. M. C. (2022). Food coating using vegetable sources: Importance and industrial potential, gaps of knowledge, current application, and future trends. *Applied Food Research*, 2(1), Article 100073. <https://doi.org/10.1016/j.afres.2022.100073>
180. Zhang, X., Hou, X., Ma, L., Shi, Y., Zhang, D., Qu, K. et al. (2023). Analytical methods for assessing antimicrobial activity of nanomaterials in complex media: Advances, challenges, and perspectives. *Journal of Nanobiotechnology*, 21(1), Article 97. <https://doi.org/10.1186/s12951-023-01851-0>
181. Akpogheli, P. O., Edo, G. I., Kasar, K. A., Zainulabdeen, K., Yousif, E., Mohammed, A. A. et al. (2024). Impact of different nitrogen sources, initial pH and varying inoculum size on the fermentation potential of *Saccharomyces cerevisiae* on wort obtained from sorghum substrate. *Food Materials Research*, 4(1), Article e021. <https://doi.org/10.48130/fmr-0024-0012>
182. Hossain, T. J. (2024). Methods for screening and evaluation of antimicrobial activity: A review of protocols, advantages, and limitations. *European Journal of Microbiology and Immunology*, 14(2), 97–115. <https://doi.org/10.1556/1886.2024.00035>
183. Edo, G. I., Ndudi, W., Makia, R. S., Jikah, A. N., Yousif, E., Gaaz, T. S. et al. (2024). Nutritional immunological effects and mechanisms of chemical constituents from the homology of medicine and food. *Phytochemistry Reviews*, 24(5), 4183–4217. <https://doi.org/10.1007/s11101-024-10034-0>
184. Korte, I., Petry, M., Kreyenschmidt, J. (2023). Antimicrobial activity of different coatings for packaging materials containing functional extenders against selected microorganisms typical for food. *Food Control*, 148, Article 109669. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2023.109669>
185. Edo, G. I., Yousif, E., Al-Mashhadani, M. H. (2024). Chitosan: Modification and biodegradability of by-products. *Polymer Bulletin*, 81(18), 16457–16507. <https://doi.org/10.1007/s00289-024-05510-8>
186. Owheruo, J. O., Edo, G. I., Makia, R. S., Gaaz, T. S., Okolie, M. C., Nwaogu, M. U. et al. (2024). Nutritional qualities of cookies made from wheat/cashew nut composite flour. *Food and Humanity*, 3, Article 100452. <https://doi.org/10.1016/j.fooHum.2024.100452>
187. Pramanik, S. K., Bhuiyan, M., Robert, D., Roychand, R., Gao, L., Cole, I. et al. (2024). Bio-corrosion in concrete sewer systems: Mechanisms and mitigation strategies. *Science of The Total Environment*, 921, Article 171231. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171231>
188. Edo, G. I., Ndudi, W., Ali, A. B. M., Yousif, E., Zainulabdeen, K., Onyibe, P. N. et al. (2024). Poly(vinyl chloride) (PVC): An updated review of its properties, polymerization, modification, recycling, and applications. *Journal of Materials Science*, 59(47), 21605–21648. <https://doi.org/10.1007/s10853-024-10471-4>
189. Edo, G. I., Nwachukwu, S. C., Makia, R. S., Jikah, A. N., Yousif, E., Gaaz, T. S. et al. (2024). Unveiling the Chinese red date (*Ziziphus jujuba*); its phytochemical, botanical, industrial and pharmacological properties: A review. *Phytochemistry Reviews*, 24(5), 4237–4270. <https://doi.org/10.1007/s11101-024-10037-x>
190. Schwibbert, K., Richter, A. M., Krüger, J., Bonse, J. (2023). Laser-textured surfaces: A way to control biofilm formation? *Laser and Photonics Reviews*, 18(1), Article 2300753. <https://doi.org/10.1002/lpor.202300753>
191. Mafe, A. N., Büsselberg, D. (2024). Mycotoxins in food: Cancer risks and strategies for control. *Foods*, 13(21), Article 3502. <https://doi.org/10.3390/foods13213502>
192. Hussein, A. K., Yousif, E., Rasheed, M. K., Edo, G. I., Bufaroosha, M., Umar, H. (2024). Synthesis, modification, and applications of poly(vinyl chloride) (PVC). *Polymer-Plastics Technology and Materials*, 64(5), 593–632. <https://doi.org/10.1080/25740881.2024.2421436>
193. Srinivasan, R., Santhakumari, S., Poonguzhali, P., Geetha, M., Dyavaiah, M., Xiangmin, L. (2021). Bacterial biofilm inhibition: A focused review on recent therapeutic strategies for combating the biofilm mediated infections. *Front Microbiol Frontiers in Microbiology*, 12, Article 676458. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.676458>
194. Bharadishettar, N., Bhat K. U., Bhat Panemangalore, D. (2021). Coating technologies for copper based antimicrobial active surfaces: A perspective review. *Metals*, 11(5), Article 711. <https://doi.org/10.3390/met11050711>
195. Anand, U., Reddy, B., Singh, V. K., Singh, A. K., Kesari, K. K., Tripathi, P. et al. (2021). Potential environmental and human health risks caused by antibiotic-resistant bacteria (ARB), antibiotic resistance genes (ARGs) and emerging contaminants (ECs) from municipal solid waste (MSW) landfill. *Antibiotics*, 10(4), Article 374. <https://doi.org/10.3390/antibiotics10040374>
196. Peretz-Andersson, E., Tabares, S., Mikalef, P., Parida, V. (2024). Artificial intelligence implementation in manufacturing SMEs: A resource orchestration approach. *International Journal of Information Management*, 77, Article 102781. <https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2024.102781>
197. Elahi, M., Afolaranmi, S. O., Martinez Lastra, J. L., Perez Garcia, J. A. (2023). A comprehensive literature review of the applications of AI techniques through the lifecycle of industrial equipment. *Discover Artificial Intelligence*, 3(1), Article 43. <https://doi.org/10.1007/s44163-023-00089-x>

AUTHOR INFORMATION	СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ
Affiliation	Принадлежность к организации
Great I. Edo , PhD, Lecturer, Department of Chemistry, Faculty of Science, Delta State University of Science and Technology P. M. B. 05, Ozoro-Kwale Road, Ozoro, Delta State, Nigeria E-mail: greatiruo@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2048-532X * corresponding author	Эдо Г. И. — PhD, преподаватель, кафедра химии, факультет естественных наук, Государственный университет науки и технологий Дельта Р. М. В. 05, дорога Озоро-Квале, Озоро, штат Дельта, Нигерия E-mail: greatiruo@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2048-532X * автор для контактов
Alice N. Mafe , Lecturer, Department of Biological Sciences, Faculty of Science, Taraba State University ATC, 660213, Ialingo, Taraba State, Nigeria E-mail: mafealice@tsuniversity.edu.ng ORCID: https://orcid.org/0009-0004-4155-5819	Мафе Э. Н. — преподаватель, кафедра биологических наук, факультет естественных наук, Государственный университет Тарабы АТК, 660213, Джалинго, штат Тараба, Нигерия E-mail: mafealice@tsuniversity.edu.ng ORCID: https://orcid.org/0009-0004-4155-5819
Tayser S. Gaaz , PhD, Lecturer, Department of Prosthetics and Orthotics Engineering, College of Engineering and Technologies, Al-Mustaqbal University Hilla, Babylon Governorate, Iraq E-mail: tayser.sumer.gaaz@uomus.edu.iq ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2352-7879	Гааз Т. С. — PhD, преподаватель, Кафедра протезирования и ортопедической инженерии, Инженерно-технологический колледж, Университет Аль-Мустакбаль Хилла, Провинция Бабилон, Ирак E-mail: tayser.sumer.gaaz@uomus.edu.iq ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2352-7879
Izuwa Iwanegbe , PhD, Lecturer, Department of Food Science and Nutrition, Faculty of Agriculture, University of Benin P.M.B. 1154, Ugbowo, Benin City, Edo State, Nigeria E-mail: izuwa.iwanegbe@uniben.edu ORCID: https://orcid.org/0009-0006-3076-1072	Иванегбе И. — PhD, преподаватель, кафедра пищевых наук и питания, сельскохозяйственный факультет, Университета Бенин Р.М.В. 1154, Угбово, Бенин-Сити, штат Эдо, Нигерия E-mail: izuwa.iwanegbe@uniben.edu ORCID: https://orcid.org/0009-0006-3076-1072
Agatha N. Jikah , PhD, Lecturer, Department of Pharmacy, Faculty of Pharmacy, Near East University Near East Boulevard, 99138, Nicosia, Cyprus E-mail: agathajikah@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0000-1202-2048-7328	Джиках А. Н. — PhD, преподаватель, кафедра фармацевтики, фармацевтический факультет, Ближневосточный университет Ближневосточный бульвар, 99138, Никозия, Кипр E-mail: agathajikah@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0000-1202-2048-7328
Kugbere Emumejaye , PhD, Senior Lecturer, Department of Physics, Faculty of Science, Delta State University of Science and Technology, Ozoro, Nigeria P. M. B. 05, Ozoro-Kwale Road, Ozoro, Delta State, Nigeria E-mail: ekugbere@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4812-8313	Эмумеджайе К. — PhD, старший преподаватель, кафедра физики, факультет естественных наук, Государственный университет науки и технологий Дельта Р. М. В. 05, дорога Озоро-Квале, Озоро, штат Дельта, Нигерия E-mail: ekugbere@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4812-8313

AUTHOR INFORMATION		СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ	
Affiliation		Принадлежность к организации	
Emad Yousif , PhD, Professor, Department of Chemistry, College of Sciences, Al-Nahrain University Al Jadriyah Bridge, 64074, Baghdad, Iraq E-mail: emad_yousif@hotmail.com ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1458-4724		Юсиф Э. — PhD, профессор, кафедра химии, Колледж естественных наук Университет Аль-Нахраин Мост Аль-Джадрия, 64074, Багдад, Ирак E-mail: emad_yousif@hotmail.com ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1458-4724	
Joseph O. Owheru , PhD, Lecturer, Department of Food Science and Technology, Faculty of Science, Delta State University of Science and Technology, Ozoro, Nigeria P. M. B. 05, Ozoro-Kwale Road, Ozoro, Delta State, Nigeria. E-mail: owheruojoseph@yahoo.com ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1588-8175		Оверуо Дж. О. — PhD, лектор, кафедра пищевой науки и технологии, факультет естественных наук, Государственный университет науки и технологий Дельта P. M. B. 05, дорога Озоро-Квале, Озоро, штат Дельта, Нигерия E-mail: owheruojoseph@yahoo.com ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1588-8175	
Ufuoma A. Igbuku , PhD, Lecturer, Department of Chemistry, Faculty of Science, Delta State University of Science and Technology P. M. B. 05, Ozoro-Kwale Road, Ozoro, Delta State, Nigeria E-mail: igbukuu@dsust.edu.ng ORCID: https://orcid.org/0230-0562-1588-8565		Игбуку У. А. — PhD, преподаватель, кафедра химии, факультет естественных наук, Государственный университет науки и технологий Дельта P. M. B. 05, дорога Озоро-Квале, Озоро, штат Дельта, Нигерия E-mail: igbukuu@dsust.edu.ng ORCID: https://orcid.org/0230-0562-1588-8565	
Ephraim E. A. Oghoro , Lecturer, Department of Petroleum Chemistry, Faculty of Science, Delta State University of Science and Technology P. M. B. 05, Ozoro-Kwale Road, Ozoro, Delta State, Nigeria E-mail: oghoroe@dsust.edu.ng ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4532-6543		Оггоро Э. Э. А. — преподаватель, кафедра химии нефти, факультет естественных наук, Государственный университет науки и технологий Дельта P. M. B. 05, дорога Озоро-Квале, Озоро, штат Дельта, Нигерия E-mail: oghoroe@dsust.edu.ng ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4532-6543	
Raghda S. Makia , PhD, Lecturer, Department of Plant Biotechnology, College of Biotechnology, Al-Nahrain University Al Jadriyah Bridge, 64074, Baghdad, Iraq E-mail: raghdahmakia@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1490-7469		Макия Р. С. — PhD, преподаватель, кафедра биотехнологии растений, Колледж биотехнологии, Университет Аль-Нахрейин Мост Аль-Джадрия, 64074, Багдад, Ирак E-mail: raghdahmakia@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1490-7469	
Arthur E. A. Essaghah , PhD, Professor, Department of Urban and Regional Planning, Faculty of Environmental Sciences, Delta State University of Science and Technology P. M. B. 05, Ozoro-Kwale Road, Ozoro, Delta State, Nigeria E-mail: arthuresa2006@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7040-2900		Эссаггах А. Э. А. — PhD, профессор, кафедра городского и регионального планирования, факультет экологических наук, Государственный университет науки и технологий Дельта P. M. B. 05, дорога Озоро-Квале, Озоро, штат Дельта, Нигерия E-mail: arthuresa2006@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7040-2900	
Dina S. Ahmed , PhD, Lecturer, Department of Chemical and Petroleum Industries Engineering Techniques, Polytechnic College of Engineering Specializations — Baghdad, Middle Technical University 10074, Baghdad, Iraq E-mail: dina_saadi@mtu.edu.iq ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2205-4061		Ахмед Д. С. — PhD, преподаватель, Факультет инженерных технологий химической и нефтяной промышленности, Политехнический колледж инженерных специальностей — Багдад, Средний технический университет 10074, Багдад, Ирак E-mail: dina_saadi@mtu.edu.iq ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2205-4061	
Huzaifa Umar , PhD, Senior Scientist, Operational Research Centre in Healthcare, Near East University Near East Boulevard, 99138, Nicosia, Cyprus E-mail: huzaifa.umar@neu.edu.tr ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2508-9710		Умар Х. — PhD, старший научный сотрудник, Центр оперативных исследований в области здравоохранения, Ближневосточный университет Ближневосточный бульвар, 99138, Никозия, Кипр E-mail: huzaifa.umar@neu.edu.tr ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2508-9710	
Contribution		Критерии авторства	
Authors equally relevant to the writing of the manuscript and equally responsible for plagiarism.		Авторы в равных долях имеют отношение к написанию рукописи и одинаково несут ответственность за плагиат.	
Conflict of interest		Конфликт интересов	
The authors declare no conflict of interest.		Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.	

DOI: <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-4-607-615>



Поступила 15.10.2025

Поступила после рецензирования 12.12.2025

Принята в печать 15.12.2025

© Кузлякина Ю. А., Замула В. С., Кузнецова О. А., Ребезов М. Б.,
Петрунина И. В., Горбунова Н. А., 2025

<https://www.fsjour.com/jour>

Научная статья

Открытый доступ

МЯСНАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ РОССИИ В ОБЛАСТИ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ

Кузлякина Ю. А.*, Замула В. С., Кузнецова О. А., Ребезов М. Б.,
Петрунина И. В., Горбунова Н. А.

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

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: АННОТАЦИЯ

устойчивое
развитие, пищевые
системы, мясная
промышленность,
мониторинг,
цели устойчивого
развития, ESG
практики

В современных условиях обеспечение глобальной и национальной продовольственной безопасности становится приоритетной задачей, требующей комплексного подхода к развитию агропромышленного комплекса. Исследование посвящено анализу современных трендов и тенденций, влияющих на достижение ключевых целей устойчивого развития, в частности ЦУР 2 (ликвидация голода), ЦУР 3 (хорошее здоровье и благополучие), ЦУР 9 (индустриализация), ЦУР 12 (ответственное потребление) и ЦУР 13 (борьба с изменением климата). Целью исследования является определение направлений повышения устойчивости пищевых систем, особенно в сегменте производства мясной продукции, путем внедрения принципов устойчивого развития и ESG-практик. В рамках исследования были использованы следующие методы: разработка специализированной анкеты для оценки внедрения ESG-принципов; проведение экспертного мониторинга предприятий мясной промышленности; анализ реализации целей устойчивого развития; оценка существующих ESG-практик. Результаты исследования включают: систематизацию современных подходов к устойчивому развитию в мясной промышленности; выявление текущего состояния внедрения ESG-принципов на предприятиях; определение основных барьеров и проблем при внедрении устойчивых практик; формирование рекомендаций по повышению эффективности реализации целей устойчивого развития. Научная новизна работы заключается в комплексном подходе к оценке устойчивости пищевых систем с учетом специфики мясной промышленности и современных глобальных вызовов. Практическая значимость исследования состоит в возможности использования полученных результатов для совершенствования управленческих решений в сфере устойчивого развития предприятий мясной промышленности, а также для разработки стратегий повышения их конкурентоспособности в условиях растущей экологической и социальной ответственности бизнеса. Результаты исследования могут быть полезны специалистам в области пищевой промышленности, представителям органов управления АПК, научным работникам и всем заинтересованным в развитии устойчивых практик в агропромышленном секторе.

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

Received 15.10.2025

Accepted in revised 12.12.2025

Accepted for publication 15.12.2025

© Kuzlyakina Yu. A., Zamula V. S., Kuznetsova O. A., Rebezov M. B.,
Petrunina I. V., Gorbunova N. A., 2025

Available online at <https://www.fsjour.com/jour>

Original scientific article

Open access

RUSSIAN MEAT INDUSTRY IN THE AREA OF SUSTAINABLE DEVELOPMENT

Yulya A. Kuzlyakina*, Valentina S. Zamula, Oxana A. Kuznetsova, Maksim B. Rebezov,
Irina V. Petrunina, Nataliya A. Gorbunova

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

KEYWORDS:

sustainable
development, food
systems, meat
industry, monitoring,
sustainable
development goals,
ESG practices

ABSTRACT

In modern conditions, assurance of the global and national food security is becoming a high-priority task that requires a complex approach to the development of the agro-industrial complex. The research is devoted to the analysis of the modern trends influencing the achievement of the key sustainable development goals, in particular SDG 2 (Zero Hunger), SDG (Good Health and Well-Being), SDG 9 (Industry, Innovation and Infrastructure) and SDG 13 (Climate Action). The aim of the study was to develop directions of increasing sustainability of food systems, especially in the segment of meat product production through introduction of the sustainable development principles and ESG practices. During the study, the following methods were used: development of a specialized questionnaire to assess the introduction of the ESG principles; expert monitoring of enterprises of the meat industry; analysis of the implementation of the sustainable development goals; assessment of the existing ESG practices. The results of the study include systematization of modern approaches to sustainable development in the meat industry, determination of the current state of introduction of ESG principles at enterprises; detection of the main barriers and challenges in introduction of the sustainable practices; formation of recommendations on an increase in efficiency of implementation of the sustainable development goals. The scientific novelty resides in the complex approach to assessment of food system sustainability with account for special features of the meat industry and current global challenges. Practical significance of the study consists in the opportunity of using the obtained results to improve management decisions in the sphere of sustainable development of meat industry enterprises as well as to develop strategies for enhancing their competitiveness in the conditions of the growing ecological and social responsibility of business. The results of the study can be useful to specialists in the area of food industry, representatives of governing bodies of the agro-industrial complex, researchers and everyone who is interested in the development of sustainable practices in the agro-industrial sector.

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

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Кузлякина, Ю. А., Замула, В. С., Кузнецова, О. А., Ребезов, М. Б., Петрунина, И. В., Горбунова, Н. А. (2025). Мясная промышленность России в области устойчивого развития. *Пищевые системы*, 8(4), 607–615. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-4-607-615>

FOR CITATION: Kuzlyakina, Yu. A., Zamula, V. S., Kuznetsova, O. A., Rebezov, M. B., Petrunina, I. V., Gorbunova, N. A. (2025). Russian meat industry in the area of sustainable development. *Food Systems*, 8(4), 607–615. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-4-607-615>

1. Введение

Агропромышленный комплекс является одним из ключевых секторов экономики, который в первую очередь обеспечивает продовольственную безопасность страны, однако он также характеризуется высокой уязвимостью к различным внешним факторам, таким как изменение климата [1,2], неустойчивые погодные условия [3,4], глобальные кризисы (пандемия COVID-19 [5–7], политическое влияние [8,9]) и их последствиями. В связи с этим особую актуальность приобретает внедрение комплексных подходов для обеспечения его устойчивого развития [10–13].

Сельскохозяйственные системы претерпевают значительные преобразования, при этом акцентируется внимание на интеграции принципов ESG (Environmental — внимательное отношение к окружающей среде, Social — социальная ответственность, Governance — ответственное корпоративное управление) в агробизнес [14,15].

Основными факторами внедрения ESG-практик в агробизнес являются потенциальная деградация окружающей среды [16,17], социальные последствия [18], растущая осведомленность потребителей, влияющая на спрос на продовольственные товары, [19,20], а также изменения в мировой торговле, приводящие к колебаниям цен на сельскохозяйственную продукцию [21–23].

Экологическая, социальная и управленческая сфера (ESG) представляет собой совокупность стратегических и операционных подходов, предназначенных для поддержки организаций различных размеров и типов в интеграции принципов устойчивого развития и социальной ответственности в их деятельность, продукты и услуги. Реализация принципов ESG способствует более ясной оценке влияния организации на окружающую среду и общество, включая ее вклад в достижение Целей устойчивого развития (ЦУР) [22,24,25].

Открытость, честность и знание фактов обо всех аспектах деятельности организации являются положительными характеристиками ESG, лежащими в основе надлежащего корпоративного управления. Такое управление предполагает всесторонний учет прямых и косвенных, индивидуальных и коллективных результатов деятельности, продуктов и услуг организаций, а также внешних воздействий независимо от их источника, типа, масштаба или юрисдикции, включая цепочки поставок и клиентов. ESG опирается на ЦУР ООН [22,24] и способствует определению позитивных социальных и экологических результатов.

Внедрение принципов ESG позволяет оперативно оценивать эффективность управленческих решений в области экологического и социального воздействия компании, вносить необходимые корректировки и учитывать их в стратегических проектах [26,27].

Усиление внимания мирового сообщества к проблеме изменения климата обусловило повышение требований к экологической и социальной политике предприятий [28].

В рамках законодательной и нормативной базы требования о раскрытии информации в области охраны окружающей среды, социальной сферы и управления (ESG) приобрели особое значение, поскольку регулирующие органы признают важность корпоративной подотчетности и устойчивой практики [29].

Действительно, введение широкомасштабного обязательного раскрытия ESG получило широкое распространение в ходе политических дискуссий, направленных на поощрение ответственного подхода к ведению бизнеса и принятию обоснованных решений заинтересованными сторонами [30].

С 2018 года действует Директива ЕС о нефинансовой Отчетности (2014/95/EC)¹, предусматривающая, что компании ЕС должны включать нефинансовую отчетность в свои годовые отчеты. В 2021 в США был издан указ, в котором подчеркивается необходимость всесторонней оценки, раскрытия информации и смягчения последствий загрязнения климата и связанных с ним рисков во всех секторах экономики [31]. Кроме того, в Восточной Азии за последнее десятилетие также наблюдался значительный рост законодательных инициатив в области ESG [32–34].

Требование ESG к раскрытию информации о выбросах парниковых газов (включая CO₂ и другие эквиваленты выбросов углерода) приобрело особую актуальность в связи с активизацией политических дискуссий об углеродной нейтральности и изменении климата [35–37].

В результате возникает углеродный риск, из которого вытекают и финансовые последствия, связанные с выбросами углекислого газа и с переходом к низкоуглеродной экономике. В связи с этим пред-

приятия должны учитывать данный фактор [38,39]. Несмотря на растущее число юрисдикций, принимающих нормативные инициативы по развитию низкоуглеродной экономики, компании по-прежнему проявляют нерешительность в раскрытии информации в отчетах ESG из-за отсутствия законодательной базы [40].

На международном уровне возрастает интерес к методам управления экологическими, социальными и управленческими рисками (ESG) или рисками устойчивого развития компаний. Особое внимание уделяется отраслям, деятельность которых может оказывать значительное воздействие на окружающую среду и общество [41,42].

Согласно канадскому исследованию [43], в котором приняли участие 135 агропродовольственных компаний, при рассмотрении вопросов устойчивого развития больше внимания уделяется управлению рисками, чем мониторингу эффективности. ESG-риски связаны с подверженностью компании негативному воздействию, обусловленному экологическими, социальными событиями или проблемами управления [43].

Важность и актуальность определенных рисков, включающие и ключевые факторы, которые влияют на деятельность компании (изменение климата, дефицит водных ресурсов, правила ответственного отбора поставщиков, проблемы использования принудительного труда в субподрядной деятельности, случаи коррупции, а также изменения предпочтений потребителей в пользу экологически чистых продуктов с низким содержанием углерода), требуют от компаний принятия существенных мер по выявлению и предотвращению рисков в сфере экологического, социального и корпоративного управления (ESG-риски) [44,45].

Агропродовольственные компании в большей степени, чем предприятия многих других отраслей, подвержены ESG-рискам, которые могут серьезно угрожать их репутации и даже существованию [42,46]. Важно отметить, что деятельность этих компаний оказывает значительное влияние на климатическую ситуацию. Согласно имеющимся данным, потребление мяса является причиной почти 15 % глобальных выбросов парниковых газов (GHG) [47]. Институциональное давление, направленное на борьбу с изменением климата, включая новые нормативные правовые акты, налоги на выбросы углекислого газа и растущую тенденцию потребителей отказываться от потребления мяса [48,49]. Это происходит как по экологическим причинам, так и из-за заботы о благополучии животных. Все эти факторы создают серьезные ESG-риски, которые агропродовольственные компании, занимающиеся переработкой продуктов животного происхождения, не могут игнорировать.

Во-вторых, ESG-риски могут иметь серьезные экономические последствия для компаний, такие как снижение инвестиционной привлекательности, потеря репутации и уменьшение рыночной стоимости. Социально ответственные инвестиции, которые в значительной степени основаны на оценке подверженности компаний ESG-рискам, за последнее десятилетие развивались очень быстрыми темпами. Финансовые рынки в целом все больше осознают эти проблемы, что проявляется в повышенном внимании инвесторов к показателям устойчивого развития компаний [50–52]. В этом контексте надлежащее управление ESG-рисками становится важным элементом финансовых показателей компаний, напрямую влияя на их стоимость и на возможности привлечения капитала [42,50].

В-третьих, несмотря на то, что корпоративная устойчивость стала важным направлением развития бизнеса, практика управления ESG-рисками остается относительно неизученной областью. Существующие исследования в этой сфере носят фрагментарный характер и концентрируются на отдельных аспектах проблематики, таких как интеграция вопросов ESG-факторов в систему управления финансовыми рисками, предотвращение рисков при использовании методов ответственного выбора поставщиков [53], обеспечение безопасности пищевых продуктов [54–57] и механизмы управления кризисными ситуациями, возникающими вследствие недостаточного учета рисков устойчивости [41,58].

Повестка устойчивого развития с каждым годом все прочнее интегрируется в национальные стратегии развития государств. Во всем мире отмечается необходимость–достижения ЦУР 2 «Ликвидация голода, обеспечение продовольственной безопасности, улучшение питания и содействие устойчивому развитию сельского хозяйства». Агропромышленная политика Российской Федерации сконцентрирована на предотвращении наступления голода и всех форм недоедания. Утверждено соответствующее законодательное регулирование в области устойчивости развития агропромышленных комплексов [59].

Экономика стран в значительной степени зависит от потребления и производства пищевой продукции, однако эта деятельность

¹ EU (2014). Directive 2014/95/EU of the European Parliament and of the Council of 22 October 2014 amending Directive 2013/34/EU as regards disclosure of non-financial and diversity information by certain large undertakings and groups Text with EEA relevance. Электронный ресурс: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2014/95/oj/eng>. Дата доступа: 12.09.2025

оказывает негативное влияние на окружающую среду и природные ресурсы, что представляет угрозу для планеты [60,61]. Таким образом, переход к рациональным моделям потребления и производства ориентирован на достижение ЦУР 3 «Хорошее здоровье и благополучие», ЦУР 9 «Индустриализация, инновации и инфраструктура», ЦУР 12 «Ответственное потребление и производство», ЦУР 13 «Борьба с изменением климата» [62,63].

Принимая во внимание важность данной проблематики, научные эксперты ФГБНУ «ФНЦ пищевых систем им. В. М. Горбатова» РАН проводят исследования в области устойчивости пищевых систем. Основное внимание уделяется вопросам обеспечения продовольственной безопасности, включая экономические, социальные и экологические аспекты производства мяса и мясной продукции.

Целью данного исследования является оценка текущей ситуации по внедрению ESG-практик и принципов устойчивого развития в предпринимательскую деятельность на предприятиях мясной промышленности в РФ.

2. Объекты и методы

Исследование состояло из четырех этапов (Рисунок 1) и проводилось в период с января по октябрь 2024 года.

Таблица 1. Анкета для установления существующей ситуации по внедрению ESG и устойчивого развития в предпринимательскую деятельность

Table 1. Questionnaire for revealing the current situation with regard to the introduction of ESG and sustainable development into the entrepreneurial activities

№	Вопросы
1	Укажите организацию, которую вы представляете: <ul style="list-style-type: none">• министерство или государственное предприятие• крупный бизнес• малое и среднее предпринимательство
2	Укажите отрасль, в которой задействована компания
3	Укажите регион
4	Знакомы ли вы с философией устойчивого развития? <ul style="list-style-type: none">• да, знакомы с национальными целями и стратегическими задачами развития РФ на период до 2024 года• да, знакомы со стратегией устойчивого развития сельских территорий Российской Федерации на период до 2030 года• да, знакомы с Целями устойчивого развития ООН• нет, не знакомы с философией устойчивого развития
5	Какие цели устойчивого развития реализуются/планируются к реализации вашим предприятием? <ul style="list-style-type: none">• ликвидация нищеты• ликвидация голода• хорошее здоровье и благополучие• качественное образование• гендерное равенство• чистая вода и санитария• недорогостоящая и чистая энергия• достойная работа и экономический рост• индустриализация, инновации и инфраструктура• уменьшение неравенства• устойчивые города и населенные пункты• ответственное потребление и производство• борьба с изменением климата• сохранение морских экосистем• сохранение экосистем суши• мир, правосудие и эффективные институты• партнерство в интересах устойчивого развития
6	Какие практики использует ваше предприятие для выполнения целей устойчивого развития? <ul style="list-style-type: none">• внедрение международных политик, кодексов и стандартов (BRC, IFC, RSPO, ISO и другие)• разработка собственных политик, кодексов и стандартов• ведение отчетности по устойчивому развитию• на нашем предприятии нет использующихся практик для выполнения Целей устойчивого развития• иные практики
7	Знакома ли вам концепция ESG? <ul style="list-style-type: none">• да, аббревиатура знакома, но нет понимая сути концепции• да, знаем, как расшифровывается аббревиатура, но понимаем суть не всех компонентов ESG• да, знаем, как расшифровывается аббревиатура и понимаем суть каждого компонента• нет, аббревиатура не знакома
8	Какие принципы ESG приоритетны на вашем предприятии? <ul style="list-style-type: none">• экологические• социальные• управленческие• мы ведем равномерную работу по всем направлениям ESG
9	Какие методы используются вашим предприятием для повышения качества ESG-практики? <ul style="list-style-type: none">• очищение сточных вод• снижение объемов выбросов в атмосферу

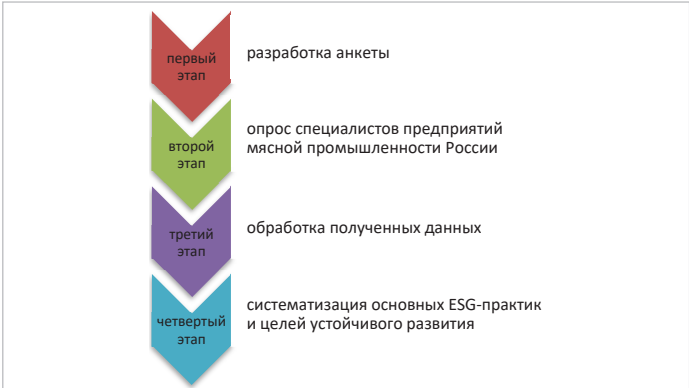


Рисунок 1. Этапы проведения исследования
Figure 1. Stages of the study

На первом этапе была разработана специализированная анкета, состоящая из 16 вопросов, для оценки внедрения ESG-принципов и устойчивого развития (Таблица 1).

№	Вопросы
	<ul style="list-style-type: none">• снижение потребления электроэнергии• выбор поставщиков с наилучшими экологическими практиками• реформация логистических цепочек (повышение уровня экологичности транспортирования продукции)• применение НДТ (наилучших доступных технологий)• стремление к безотходному производству• применение биоразлагаемых материалов• утилизация/переработка отходов• не используем практики, направленные на экологические принципы ESG• другое (указать ниже)
10	Поддерживаете ли вы дополнительное образование и переподготовку по повестке устойчивого развития и практике ESG в целом? <ul style="list-style-type: none">• да• скорее да• скорее нет• нет
11	Предъявляются ли вашей компании требования по внедрению ESG от контрагентов (поставщиков, заказчиков)? Например, повышение экологичности производства, принципы инклюзивности и разнообразия в HR-политике? <ul style="list-style-type: none">• почти всегда• иногда• редко• нет
12	К каким положительным последствиям, по вашему мнению, может привести внедрение ESG? <ul style="list-style-type: none">• дополнительное финансирование• участие в льготных программах• привлечение персонала• повышение эффективности менеджмента компании• повышение репутации среди потребителей и поставщиков• улучшение экологической обстановки• снижение штрафных санкций• другое (указать ниже)
13	Как вы считаете, содействует ли внедрение ESG в деятельность организаций обеспечению устойчивого развития? <ul style="list-style-type: none">• да, внедрение ESG положительно влияет на обеспечение устойчивого развития• нет, внедрение ESG не влияет на устойчивое развитие
14	Как вы считаете, какие существуют проблемы внедрения ESG в предпринимательскую деятельность? <ul style="list-style-type: none">• недостаточно развитая база стандартов ESG• отсутствие инвестирования со стороны бизнеса• недостаточные объемы государственной поддержки• низкая осведомленность представителей малого и среднего предпринимательства в вопросах ESG и устойчивого развития• отсутствие представления о последствиях внедрения ESG• отсутствие видимых положительных результатов от внедрения ESG• другое (указать ниже)
15	Как вы считаете, необходимо ли развивать стандарты ESG в Российской Федерации? <ul style="list-style-type: none">• да• нет• затрудняюсь ответить
16	Какие риски, по вашему мнению, могут возникнуть при внедрении ESG? <ul style="list-style-type: none">• отсутствие положительных эффектов от внедрения ESG• уход с рынка малого и среднего предпринимательства, не имеющих ресурсов на внедрение ESG• появление неравных условий для компаний, внедривших ESG-практики, и компаний, временно или полностью отказавшихся от их внедрения• быстро изменяющиеся тренды, связанные с ESG-практиками• другое (указать ниже)

ЦУР 4 «Качественное образование» — 20,9%; ЦУР 5 «Гендерное равенство» — 7,0%; ЦУР 6 «Чистая вода и санитария» — 25,6%; ЦУР 7 «Недорогостоящая и чистая энергия» — 4,7%; ЦУР 8 «Достойная работа и экономический рост» — 69,8%; ЦУР 9 «Индустриализация, инновации и инфраструктура» — 14,0%; ЦУР 10 «Уменьшение неравенства» — 2,3%; ЦУР 11 «Устойчивые города и населенные пункты» — 14,0%; ЦУР 12 «Ответственное потребление и производство» — 53,5%; ЦУР 13 «Борьба с изменением климата» — 7,0%; ЦУР 14 «Сохранение морских экосистем» — 2,3%; ЦУР 15 «Сохранение экосистем суши» — 2,3%; ЦУР 16 «Мир, правосудие и эффективные институты» — 23,3%; ЦУР 17 «Партнерство в интересах устойчивого развития» — 9,3%. В первую очередь можно отметить направленность предприятий на обеспечение устойчивого экономического роста и создание условий для достойной занятости, стимулирующей развитие экономики без ущерба для окружающей среды. Одновременно, стоит акцентировать внимание на стремлении компаний осуществлять переход к рациональным моделям потребления и производству, что является ключевым фактором в условиях глобального роста населения и увеличения спроса на различную продукцию. В целом наблюдается вовлеченность предприятий в достижение целей устойчивого развития посредством стимулирования эффективности использования ресурсов и энергии, создания устойчивой инфраструктуры, а также изменения моделей потребления и производства. Указанные меры необходимы для предотвращения природных катастроф, загрязнения планеты и для обеспечения благополучия нынешних и будущих поколений. При этом компаниям следует применять следующие практики для выполнения целей устойчивого развития: внедрение международных политик, кодексов и стандартов (BRC, IFC, RSPO, ISO и другие), разработка собственных политик, кодексов и стандартов, ведение отчетности по устойчивому развитию.

Для повышения качества ESG-практики респондентами были представлены методы, используемые на предприятиях (в процентах от общего числа опрошенных): очищение сточных вод — 23,8%; снижение объемов выбросов в атмосферу — 40,5%; снижение потребления электроэнергии — 28,6%; выбор поставщиков с наилучшими экологическими практиками — 21,4%; реформация логистических цепочек (повышение уровня экологичности транспортирования продукции) — 9,5%; применение НДТ (наилучших доступных технологий) — 40,5%; стремление к безотходному производству — 38,1%; применение биоразлагаемых материалов, утилизация/переработка отходов — 14,3% (Рисунок 7). Анализируя полученные данные, можно отметить, что особое внимание предприятиями уделяется окружающей среде, большое количество мероприятий направлено на уменьшение негативного влияния на экологию.

Одновременно отмечены проблемы внедрения ESG в предпринимательскую деятельность (Рисунок 8): недостаточно развитая база стандартов ESG — 41,50%; отсутствие инвестирования со стороны бизнеса — 24,40%; недостаточные объемы государственной поддержки — 34,10%; низкая осведомленность представителей малого и среднего предпринимательства в вопросах ESG и устойчивого развития — 78,00%; отсутствие представления о последствиях внедрения ESG — 39,00%; отсутствие видимых положительных результатов от внедрения ESG — 26,80%. Исходя из данных, можно выявить следующие риски, связанные с внедрением ESG в предпринимательскую деятельность:

- уход с рынка малого и среднего предпринимательства, не имеющих ресурсов на внедрение ESG;
- появление неравных условий для компаний, внедривших ESG-практики, и компаний, временно или полностью отказавшихся от их внедрения;
- быстро изменяющиеся тренды, связанные с ESG-практиками;
- отсутствие положительных эффектов от внедрения ESG.

Вместе с тем необходимо отметить повышенное внимание к ESG-отчетности, что представляет собой как вызовы, так и возможности для многих компаний. Точная и достоверная отчетность создает возможности для выявления рисков и поиска эффективных решений, направленных на минимизацию последствий изменения климата и сокращения углеродного следа, а также на решение секторальных задач, связанных с точным сбором данных и использованием передовых технологий. В настоящее время отсутствует государственное регулирование концепции ESG. Кроме того, увеличенное внимание к ESG обуславливает необходимость стандартизированного подхода, что можно рассматривать как общую тенденцию развития ESG-отчетности в будущем.

Ввиду быстро изменяющихся трендов, связанных с ESG-практиками, по итогам анкетирования была подчеркнута необходимость внедрения ESG в концепцию построения и реализации устойчивого развития мясоперерабатывающих предприятий (97,1% от общего количества опрошенных) (Рисунок 9).

Применение концептуальной модели ESG позволяет минимизировать негативные эффекты внешних воздействий и повысить конкурентоспособность сельхозпредприятий (Рисунок 10).

В современных реалиях, когда российская продовольственная безопасность зависит от множества факторов и вызовов, при анализе устойчивости цепи производства мясной продукции необходимо рассматривать современные тенденции и лучшие практики в направлении повышения устойчивого развития.

С учетом мирового опыта при систематизации и анализе данных, полученных при мониторинге предприятий, прослеживается необходимость более широкой информационной и методической

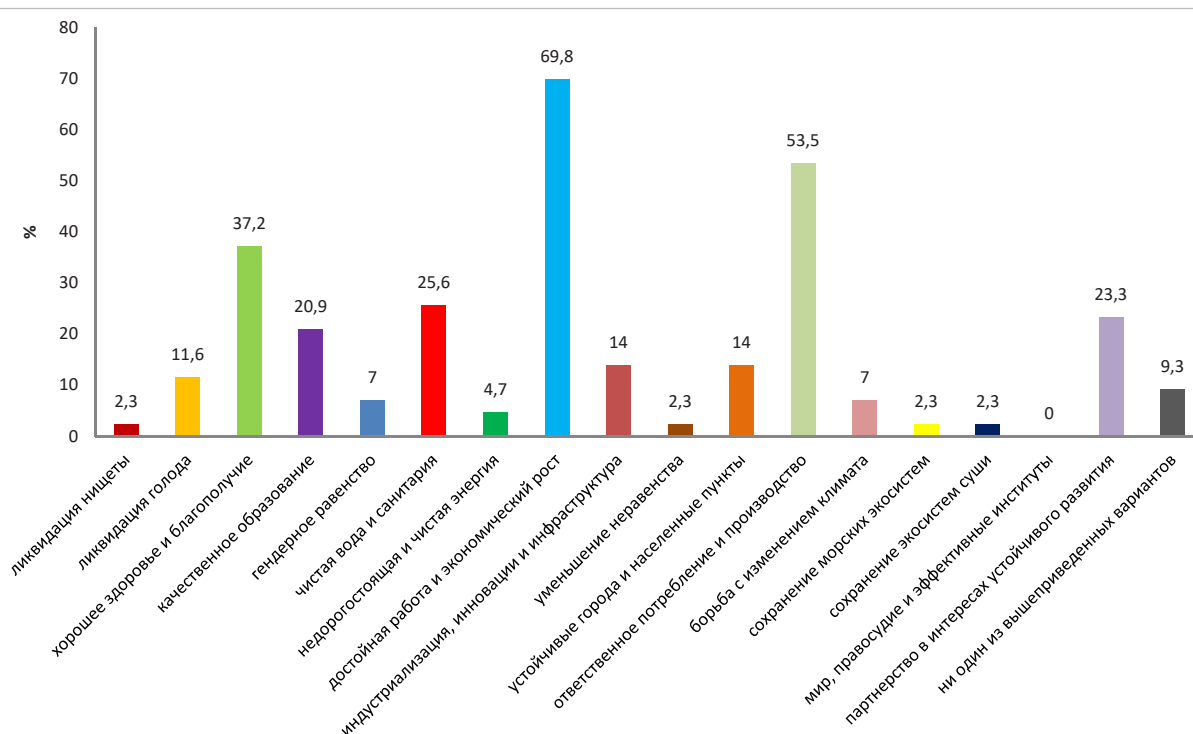
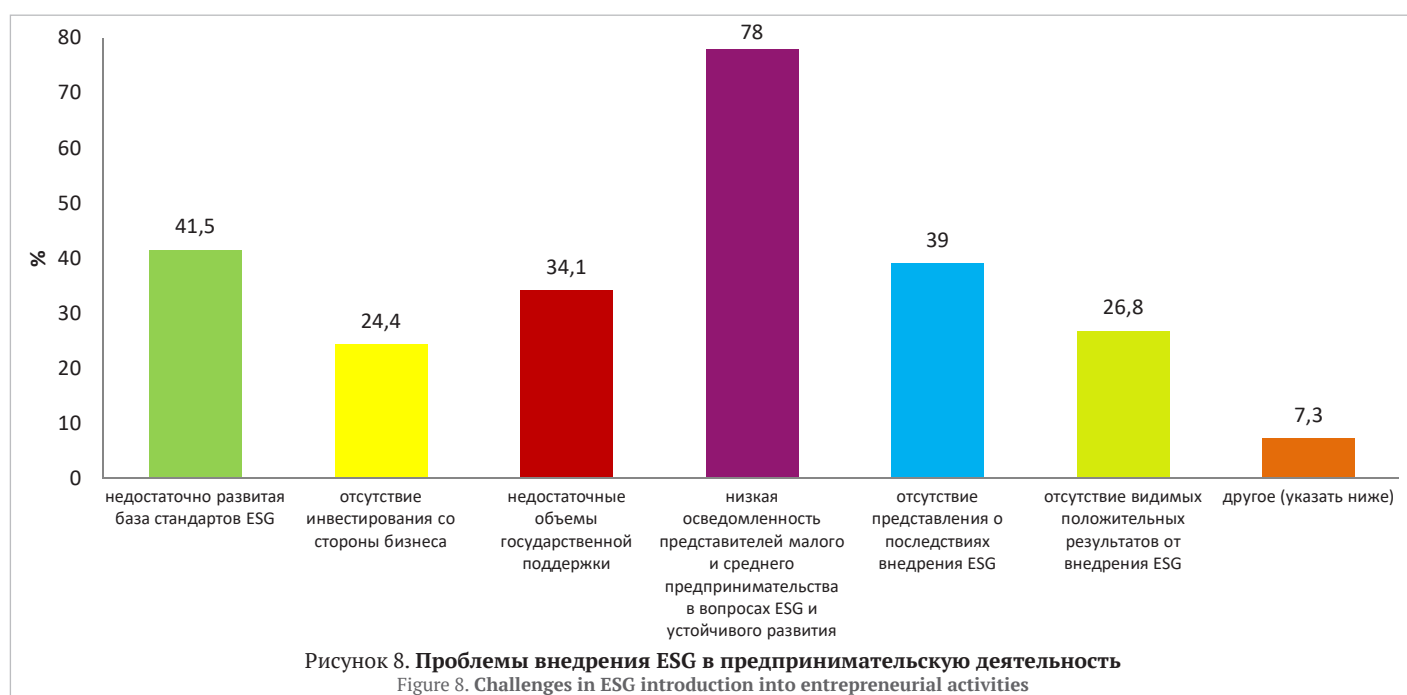
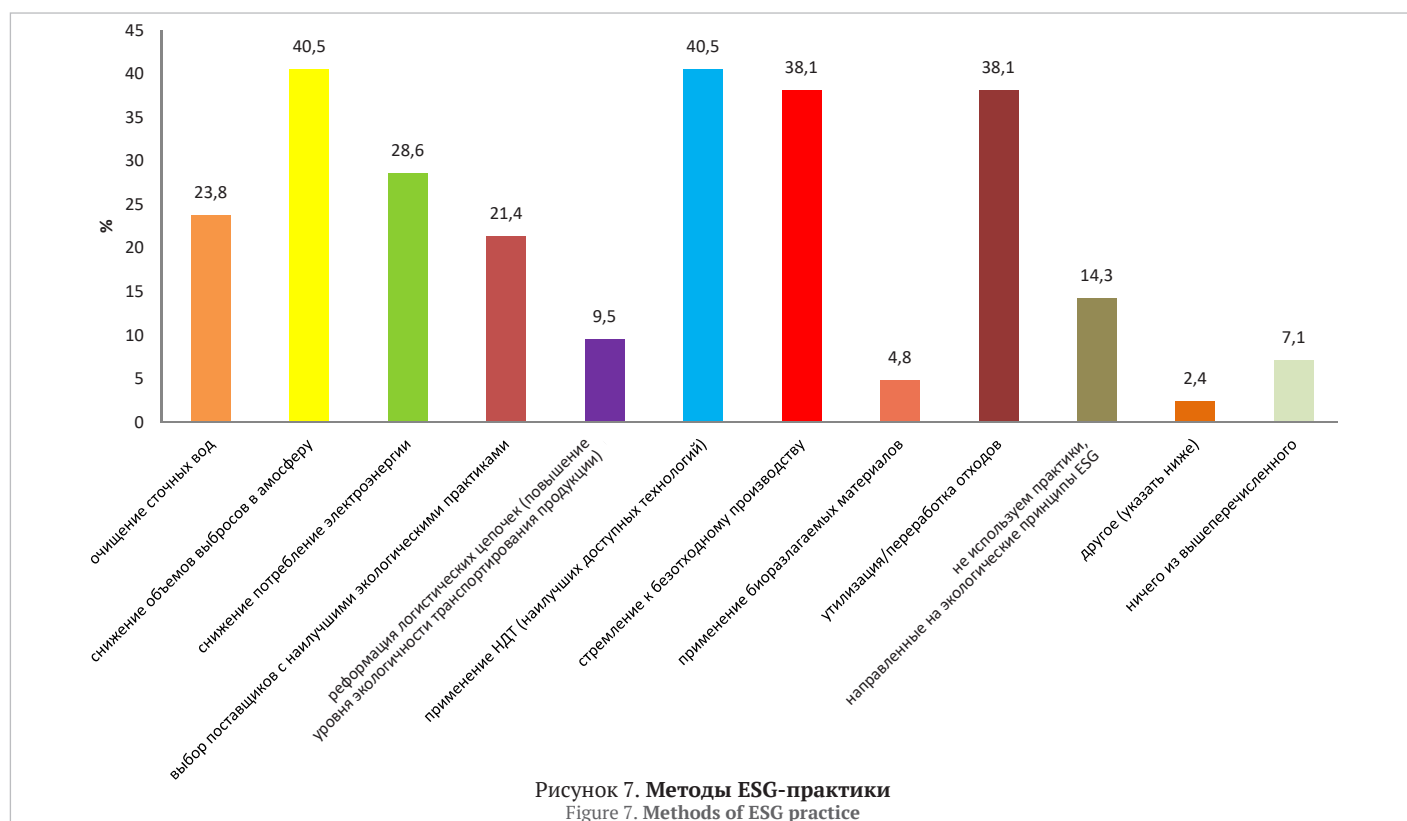


Рисунок 6. Цели устойчивого развития, которые реализуются/планируются к достижению, %
Figure 6. Sustainable development goals that are realized/planned for achievement, %



поддержки при внедрения ESG-практик для обеспечения устойчивости функционирования мясной промышленности и повышения эффективности ее деятельности. Также отмечается необходимость разработки системы стандартов, адаптированных для российских предприятий по достижению основных целей устойчивого развития. При этом требуется научная проработка методов достижения баланса при внедрении экологических, инновационных и социальных инициатив, исключающих значительное влияние на экономические показатели и себестоимость продукции. ESG-трансформация позволяет оперативно оценивать эффективность управленческих решений в области экологического и социального воздействия компании ЦУР на достижение, а также вносить необходимые корректировки и учитывать их в стратегических проектах.

По итогам проведенного исследования, для успешного внедрения ESG-подходов рекомендуем следующее:

1. **Государственная поддержка:** разработать специальные программы субсидирования и налоговых льгот для предприятий, внедряющих ресурсосберегающие технологии и экологические мероприятия;
2. **Повышение квалификации персонала:** организовать курсы и семинары для сотрудников мясной промышленности, направленные на ознакомление с современными методами эколого-социального менеджмента;
3. **Стандартизация:** создать систему обязательных стандартов ESG, разработанных специально для российских предприятий мясной промышленности;
4. **Развитие образовательных программ:** включить элементы устойчивого развития в учебные планы вузов и профильных курсов повышения квалификации;
5. **Информационная кампания:** регулярно проводить просветительские кампании, разъясняющие выгоды и возможности, связанные с внедрением ESG;

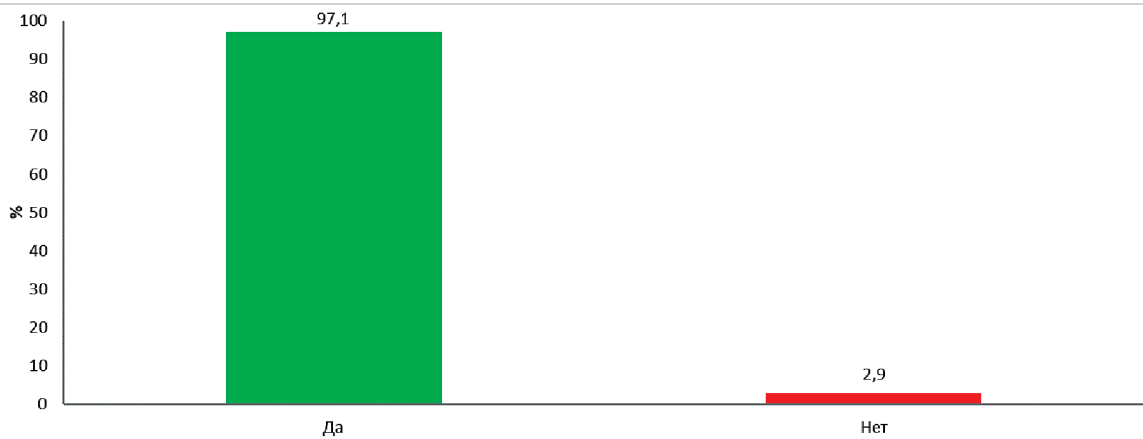


Рисунок 9. Необходимость развития стандартов ESG в Российской Федерации, %
Figure 9. A need for the development of ESG standards in the Russian Federation, %



Рисунок 10. Основные факторы
Figure 10. The main factors

Эти меры позволяют значительно ускорить процесс перехода на устойчивое производство и создать благоприятные условия для экономического роста, сохранения окружающей среды и повышения общественного доверия.

Таким образом, данное исследование предлагает конкретные шаги по ускоренному продвижению принципов устойчивого развития в российском секторе мясоперерабатывающей промышленности, способствующие росту конкурентоспособности предприятий и обеспечению высоких стандартов экологической и социальной защиты.

4. Заключение

Результаты исследования демонстрируют необходимость системного подхода к внедрению ESG-принципов в мясной промышленности. При этом 97,1% респондентов подчеркивают актуальность интеграции ESG в стратегию развития предприятий мясопереработки. Реализация предложенных рекомендаций позволит повысить конкурентоспособность мясной промышленности и обеспечить устойчивое развитие сектора.

По итогам проведенного исследования нами выявлены ключевые проблемы и сформулированы рекомендации для руководителей российских предприятий мясной промышленности и государственных служб:

- Необходимо усилить работу по информированию сотрудников о преимуществах ESG-подходов и повышению их мотивации к вовлечению в процессы устойчивого развития;
- Следует уделять особое внимание технологическому перевооружению предприятий мясной промышленности, позволяющему снижать негативное воздействие на окружающую среду и повышать уровень социальной ответственности;
- Важно развивать сотрудничество между бизнесом и государственными органами для выработки единых стандартов, способствующих успешному внедрению ESG-концепций;
- Необходима дальнейшая работа над повышением прозрачности отчетности и совершенствованию процедур аудита, обеспечивающих достоверность представляемых данных.

REFERENCES

1. Lai, Y., Du, R., He, J., Zhou, J., Yao, L. (2025). Vicious cycle or virtuous feedback? Revisiting the impact of climate risk on agricultural carbon emissions in China. *Climate Smart Agriculture*, 2(3), Article 100065. <https://doi.org/10.1016/j.csag.2025.100065>

2. Alam, A., Banna, H., Roni, N. N., Abedin, M.Z. (2025). Sowing sustainability: How does fintech mitigate agricultural financial risk from climate change vulnerability. *International Review of Economics and Finance*, 101, Article 104226. <https://doi.org/10.1016/j.iref.2025.104226>

3. Mao, H., Sun, Z., Chai, A., Fang, L., Shi, C. (2025). Extreme weather, agricultural insurance and farmer's climate adaptation technologies adoption in China. *Ecological Economics*, 228, Article 108456. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2024.108456>

4. Crofils, C., Gallic, E., Vermandel, G. (2025). The dynamic effects of weather shocks on agricultural production. *Journal of Environmental Economics and Management*, 130, Article 103078. <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2024.103078>

5. Iuga, I. C., Mudakkar, S. R., Dragolea, L. L. (2024). Agricultural commodities market reaction to COVID-19. *Research in International Business and Finance*, 69, Article 102287. <https://doi.org/10.1016/j.ribaf.2024.102287>
6. Yao, P., Fan, H., Wu, Q., Ouyang, J., Li, K. (2023). Compound impact of COVID-19, economy and climate on the spatial distribution of global agriculture and food security. *Science of The Total Environment*, 880, Article 163105. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163105>
7. Rauf, A., Abu-Izneid, T., Olatunde, A., Khalil, A., Alhumaydhi, F. A., Tufail, T. et al. (2020). COVID-19 pandemic: Epidemiology, etiology, conventional and non-conventional therapies. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(21), Article 8155. <https://doi.org/10.3390/ijerph17218155>
8. Xu, Y., Huang, W., Zhang, C. Y. (2024). Navigating international competition with ESG: Insights from the US-China trade war. *Research in International Business and Finance*, 70(Part B), Article 102364. <https://doi.org/10.1016/j.ribaf.2024.102364>
9. Sha, F., Meng, J., Zheng, X., Jiang, Y. (2025). Sustainability under fire: How China-US tensions impact corporate ESG performance? *Finance Research Letters*, 85(Part A), Article 107882. <https://doi.org/10.1016/j.frl.2025.107882>
10. Bertacchini, F., Cimino, A., Fusto, C., Manfredi, K., Mirabelli, G., Solina, V. (2025). ICTs and smallholders: A systematic review of case studies and their impact on ESG outcomes. *Procedia Computer Science*, 253, 3276–3287. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2025.02.052>
11. Zolkin, A. L., Matvienko, E. V., Shmoilov, A. N., Rudnev, S. G., Urusova, A. B. (2024). Development of scientific potential and introduction of innovative solutions to ensure competitiveness and further development of the agro-industrial complex of Russia. *E3S Web of conference*, 486, Article 01001. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202448601001>
12. Колчин С. П., Осянин Д. Н. (2024). Устойчивое развитие мясоперерабатывающих предприятий: путь к успеху в будущем. *Мясная индустрия*, 9, 40–42. [Kolchin, S. P., Osyenin, D. N. (2024). Sustainable development of meat processing enterprises: A way to success in the future. *Meat Industry*, 9, 40–42. (In Russian)]
13. Красюкова, Н. Л. (2025). Использование блокчейн-технологии и больших данных для обеспечения прослеживаемости и устойчивости агропродовольственных цепочек поставок. *Аграрная наука*, 6, 167–171. [Krasuykova, N. L. (2025). Using blockchain technology and big data to ensure the traceability and sustainability of agri-food supply chains. *Agrarian Science*, 6, 167–171. (In Russian)] <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-395-06-167-171>
14. Chen, T., Yin, D., Li, X., Xu, X. (2025). Media attention, information asymmetry and agribusiness ESG rating divergence. *Finance Research Letters*, 74, Article 106721. <https://doi.org/10.1016/j.frl.2024.106721>
15. Красюкова, Н. Л. (2025). Интеграция блокчейн-технологий в управление агропромышленными холдингами: драйверы эффективности и устойчивого развития. *Аграрная наука*, 4, 177–179 [Krasuykova, N. L. (2025). Integration of blockchain technologies into the management of agro-industrial holdings: Drivers of efficiency and sustainable development. *Agrarian Science*, 4, 177–179. (In Russian)] <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-393-04-177-179>
16. Fu, Z., Zhang, C., Huang, Z., Jia, L., Sun, G., Wang, W. (2025). Advancing sustainable and innovative agriculture: An empirical study of farmers' livelihood risks and the green transformation of food production. *Journal of Innovation and Knowledge*, 10(4), Article 100732. <https://doi.org/10.1016/j.jik.2025.100732>
17. Tan, D., Adedoyin, F. F., Alvarado, R., Ramzan, M., Kayesh, S., Shah, M. I. (2022). The effects of environmental degradation on agriculture: Evidence from European countries. *Gondwana Research*, 106, 92–104. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2021.12.009>
18. Nonvide, G. M. A., Ouinsou, C.-A., Degbedji, D. F. (2025). Agricultural risks and food security in Benin: Role of social protection policy. *Development and Sustainability in Economics and Finance*, 7, Article 100071. <https://doi.org/10.1016/j.dsef.2025.100071>
19. Sharko, E. R., Sokolova, A. A. (2025). Factors of consumer trust in private label food products: A case of loyalty to Russian retailers. *Journal of Applied Economic Research*, 24(1), 344–378. <https://doi.org/10.15826/vestnik.2025.24.1.012>
20. Zhang, Y., Zhao, W. (2025). Examining agricultural firms' risk-bearing capability via supply chain financing: Insights from China. *International Review of Economics and Finance*, 102, Article 104282. <https://doi.org/10.1016/j.iref.2025.104282>
21. de Almeida, A. C. L., Bueno, C., Dale, A., Hay, R., Jarihani, B., Everingham, Y. et al. (2025). Integration of ESG standards in Australian sugarcane farming: A co-design approach to accelerate ESG adoption and innovation. *Agricultural Systems*, 229, Article 104438. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2025.104438>
22. United Nations. Department of Economic and Social Affairs. Sustainable Development. (2015). Transforming our world: The 2030 Agenda for Sustainable Development. Retrieved from <https://sdgs.un.org/2030agenda> Accessed June 15, 2025
23. Маслова, В. В., Авдеев, М. В. (2025). О ценах на продовольственную продукцию на потребительском рынке. *Экономика, труд, управление в сельском хозяйстве*, 2, 27–37. [Maslova, V. V., Avdeev, M. V. (2025). About food prices in the consumer market. *Economics, Labor, Management in Agriculture*, 2, 27–37. (In Russian)] <https://doi.org/10.33938/252-27>
24. United Nations. Department of Economic and Social Affairs. Sustainable Development. (2015). The 17 goals. Retrieved from <https://sdgs.un.org/goals> Accessed June 15, 2025
25. Azam, A., Shafique, M., Rafiq, M., Ateeq, M. (2023). Moving toward sustainable agriculture: The nexus between clean energy, ICT, human capital and environmental degradation under SDG policies in European countries. *Energy Strategy Reviews*, 50, Article 101252. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2023.101252>
26. Wang, J., Baolei, Q., Yan, L., Hossain, M. I., Tian, H. (2024). Does institutional commitment affect ESG performance of firms? Evidence from the United Nations principles for responsible investment. *Energy Economics*, 130, Article 107302. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2024.107302>
27. Nezhnikova, E. (2024). ESG approaches in business as the formation of new thinking. *Reliability: Theory and Applications*, 19(S6(81)), 998–1005. <https://doi.org/10.24412/1932-2321-2024-681-998-1005>
28. Ветрова, М. А., Пахомова, Н. В., Львова, Н. А., Лемешко, Н. А. (2025). Климатические проекты Российского бизнеса: методология обоснования и рамочные условия успешной реализации. *Вестник Санкт-Петербургского университета. Экономика*, 41(1), 66–92. [Vetrova, M. A., Pakhomova, N. V., Lvova, N. A., Lemesheko, N. A. (2025). Climate projects of Russian business: Justification methodology and framework conditions for successful implementation. *St. Petersburg University Journal of Economic Studies*, 41(1), 66–92. (In Russian)]
29. Tsang, A., Wang, Y., Xiang, Y., Yu, L. (2024). The rise of ESG rating agencies and management of corporate ESG violations. *Journal of Banking and Finance*, 169, Article 107512. <https://doi.org/10.1016/j.jbankfin.2024.107512>
30. Hao, J., Sun, R., Gong, X., Zhu, X. R. (2025). ESG and stock price crash risk revisited: Evidence from mandatory ESG disclosure policy in China. *Pacific-Basin Finance Journal*, 91, Article 102729. <https://doi.org/10.1016/j.pacfin.2025.102729>
31. Han, S., Lu, H., Wu, H. (2024). ESG disclosure, investor awareness, and carbon risk pricing: Evidence from the Chinese market. *International Review of Law and Economics*, 80, Article 106217. <https://doi.org/10.1016/j.irle.2024.106217>
32. Tian, Y., Hou, A., Hu, C.-C., Chai, L. (2025). Policy-driven ESG mandates for immediate financial performance and long-term Innovation: Synergistic insights from Chinese enterprises. *Journal of Cleaner Production*, 520, 146142. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.146142>
33. Li, Y., Zeng, J. C., Jiang, S. (2025). Does environmental regulation complement ESG Disclosure? Evidence from the emergence of pollution emission permits regime in China. *Economics Letters*, 254, Article 112442. <https://doi.org/10.1016/j.econlet.2025.112442>
34. Li, F., Liu, J., Liu, H. (2025). Institutions empowerment for sustainability: ESG performance and enterprise green innovation — Evidence from China. *Journal of Environmental Management*, 388, Article 125947. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.125947>
35. Брюханов, А. Ю., Васильев, Э. В., Базыкин, В. И., Шалавина, Е. В. (2025). Оценка концентраций климатически активных веществ в выбросах при переработке твердых побочных продуктов животноводства. *Аграрная наука*, 5, 141–147. [Briukhanov, A. Yu., Vasiliev, E. V., Bazykin, V. I., Shalavina, E. V. (2025). Estimation of concentrations of climate-active substances in emissions from processing of solid animal by-products. *Agrarian Science*, 5, 141–147. (In Russian)] <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-394-05-141-147>
36. Романцева, Ю. Н., Бодур, А. М., Маслакова, В. В., Кагирова, М. В. (2024). Анализ динамики и структуры эмиссии парниковых газов в сельском хозяйстве России. *Аграрная наука*, 2, 139–145. [Romantseva, Yu. N., Bodur, A. M., Maslakova, V. V., Kagirowa, M. V. (2024). Analysis of the dynamics and structure of greenhouse gas emissions in Russian agriculture. *Agrarian Science*, 2, 139–145. (In Russian)] <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2024-379-2-139-145>
37. Петрунина, И. В., Горбунова, Н. А. (2022). Системные меры по снижению выбросов парниковых газов в животноводческих хозяйствах. Обзор. *Пищевые системы*, 5(3), 202–211. [Petrulina, I. V., Gorbunova, N. A. (2022). Systemic measures on reduction of greenhouse gas emissions in animal husbandry enterprises. A review. *Food Systems*, 5(3), 202–211. (In Russian)] <https://doi.org/10.21523/2618-9771-2022-5-3-202-211>
38. Ma, S., Appolloni, A. (2025). Can financial flexibility enhance corporate green innovation performance? Evidence from an ESG approach in China. *Journal of Environmental Management*, 387, Article 125869. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.125869>
39. Bolton, P., Kacperczyk, M. (2021). Do investors care about carbon risk? *Journal of Financial Economics*, 142(2), 517–549. <https://doi.org/10.1016/j.jfineco.2021.05.008>
40. Lee, M. T., Raschke, R. L. (2023). Stakeholder legitimacy in firm greening and financial performance: What about greenwashing temptations? *Journal of Business Research*, 155(B), Article 113393. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2022.113393>
41. Medina-Serrano, R., González-Ramírez, R., Gascó, J., Llopis, J. (2021). How to evaluate supply chain risks, including sustainable aspects? A case study from the German industry. *Journal of Industrial Engineering and Management*, 14(2), 120–134. <https://doi.org/10.3926/jiem.3175>
42. Sandberg, H., Alnoor, A., Tiberius, V. (2022). Environmental, social, and governance ratings and financial performance: Evidence from the European food industry. *Business Strategy and the Environment*, 32(4), 2471–2489. <https://doi.org/10.1002/bse.3259>
43. Boiral, O., Brotherton, M.-C., Talbot, D., Guillaumie, L. (2024). Assessing and managing environmental, social, and governance risks in agri-food companies. *Corporate Social Responsibility and Environmental Management*, 31(6), 5690–5708. <https://doi.org/10.1002/csr.2884>
44. Drapinski, J., Ganzel, N., Maylen, R., Brousseau, Y. (2022). Overview of environmental, social, and government reporting in the food industry: Past, present, and future. A project submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of: Master of Science (School for Environment and Sustainability) at the University of Michigan. <https://doi.org/10.7302/4359>
45. Popescu, I.-S., Hitaj, C., Benetto, E. (2021). Measuring the sustainability of investment funds: A critical review of methods and frameworks in sustainable finance. *Journal of Cleaner Production*, 314, Article 128016. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128016>
46. Patterson, G. T., Thomas, L. F., Coyne, L. A., Rushton, J. (2020). Moving health to the heart of agri-food policies: mitigating risk from our food systems. *Global Food Security*, 26, Article 100424. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2020.100424>
47. Barthelmie, R. J. (2022). Impact of dietary meat and animal products on GHG footprints: The UK and the US. *Climate*, 10(3), Article 43. <https://doi.org/10.3390/cli10030043>
48. Gorbunova, N. A. (2025). Assessment of the consumers' attitude to the alternative meat. Review. *Theory and Practice of Meat Processing*, 10(1), 54–66. <https://doi.org/10.21323/2414-438X-2025-10-1-54-66>
49. Соколов, Ф. С., Фоменко, А. К., Маев, И. В., Андреев, Д. Н., Донцова, О. А., Сергиев, П. В. и др. (2025). Перспективы использования заменителей мяса растительного происхождения. *Профилактическая медицина*, 28(2), 103–108. [Sokolov, F. S., Fomenko, A. K., Maev, I. V., Andreev, D. N., Dontsova,

O. A., Sergiev, P. V. et al. (2025). Prospects for the use of meat vegetable origin substitutes. *Russian Journal of Preventive Medicine*, 28(2), 103–108. (In Russian)] <https://doi.org/10.17116/profmed202528021103>

50. Tarulli, A., Morrone, D., Conte, D., Bussoli, C., Russo, A. (2022). The relevance of non-financial disclosure in influencing the cost of capital: Empirical evidence from the agri-food sector. *Business Strategy and the Environment*, 32(4), 1739–1751. <https://doi.org/10.1002/bse.3215>

51. Erhemjamts, O., Huang, K., Tehranian, H. (2024). Climate risk, ESG performance, and Sentiment in US commercial banks. *Global Finance Journal*, 59, Article 100924. <https://doi.org/10.1016/j.gfi.2023.100924>

52. Busco, C., Consolandi, C., Eccles, R. G., Sofra, E. (2020). A Preliminary Analysis of SASB Reporting: Disclosure topics, financial relevance, and the financial intensity of ESG materiality. *Journal of Applied Corporate Finance*, 32(2), 117–125. <https://doi.org/10.1111/jacf.12411>

53. Юсупова, Л. А., Антипова, О. В. (2023). Устойчивый выбор поставщиков и подрядчиков на основе метода анализа иерархий. *Russian Economic Bulletin*, 6(5), 222–229. [Yusupova, L. A., Antipova, O. V. (2023). Sustainable selection of suppliers and contractors based on analytic hierarchy process. *Russian Economic Bulletin*, 6(5), 222–229. (In Russian)]

54. Spanova, A., Nurgazezova, A., Rebezov, M., Nurymkhan, G., Assirzhanova, Z., Kazhibayeva G. et al. (2025). Hazard analysis and critical control point (HACCP) application to the production of a new low-fat meat patty. *Cogent Food and Agriculture*, 11(1), Article 2546081. <https://doi.org/10.1080/23311932.2025.2546081>

55. Rebezov, M., Khayrullin, M., Assenova, B., Farida, S., Baydan, D., Garipova, L. et al. (2024). Improving meat quality and safety: Innovative strategies. *Potravinarstvo Slovak Journal of Food Sciences*, 18, 523–546. <https://doi.org/10.5219/1972>

56. Atambayeva, Z., Nurgazezova, A., Rebezov, M., Kazhibayeva, G., Kassymov, S., Sviderskaya, D. et al. (2022) A risk and hazard analysis model for the production process of a new meat product blended with germinated green buckwheat and food safety awareness. *Frontiers in Nutrition*, 9, Article 902760. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.902760>

57. Rebezov, M., Chughtai, M. F. J., Mehmood, T., Khaliq, A., Tanweer, S., Semenova, A. et al. (2022). Novel techniques for microbiological safety in meat and fish industries. *Applied Sciences*, 12(1), Article 319. <https://doi.org/10.3390/app12010319>

58. Андреев, П. Е. (2021). Антикризисное управление устойчивым предприятием. *Russian Economic Bulletin*, 4(2), 71–76. [Andreev, P. E. (2021). Anti-crisis management of a sustainable enterprise. *Russian Economic Bulletin*, 4(2), 71–76. (In Russian)]

59. Kuzlyakina, Yu. A., Zamula, V. S., Kuznetsova, O. A. (2023). Analysis of agriculture sustainable development in Russia. *Theory and Practice of Meat Processing*, 8(2), 93–99. <https://doi.org/10.21323/2414-438X-2023-8-2-93-99>

60. Oke, A., McKenzie, K., Osobajo, O., Lawani, A. (2023). Effects of millennials willingness to pay on buying behaviour at ethical and socially responsible restaurants: Serial mediation analysis. *International Journal of Hospitality Management*, 113, Article 103507. <https://doi.org/10.1016/j.ijhm.2023.103507>

61. Yong, R. Y. M., Chua, B.-L., Fakfare, P., Han, H. (2024). Sustainability a la carte: A systematic review of green restaurant research (2010–2023). *Journal of Travel and Tourism Marketing*, 41(4), 508–537. <https://doi.org/10.1080/10548408.2023.2293014>

62. Tiwari, S., Sharif, A., Sofuoglu, E., Nuta, F. (2025). A step toward the attainment of carbon neutrality and SDG-13: Role of financial depth and green technology innovation. *Research in International Business and Finance*, 73(A), Article 102631. <https://doi.org/10.1016/j.ribaf.2024.102631>

63. Замула, В. С., Кузлякина, Ю. А., Кузнецова, О. А., Бирюкова, А. И. (2024). Управление отходами как элемент устойчивого развития мясоперерабатывающего предприятия. *Все о мясе*, 2, 3–5. [Zamula, V. S., Kuzlyakina, Yu. A., Kuznetsova, O. A., Biryukova, A. I. (2024). Waste management as an element of sustainable development of a meat processing enterprise. *Vsyo o Myase*, 2, 3–5. (In Russian)] <https://doi.org/10.21323/2071-2499-2024-2-3-5>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ	AUTHOR INFORMATION
Принадлежность к организации	Affiliation
Кузлякина Юлия Александровна — кандидат технических наук, главный научный сотрудник, Отдел «Технического регулирования», Федеральный научный центр пищевых систем им. В. М. Горбатова 109316, Москва, ул. Талалихина, 26 E-mail: yu.kuzlyakina@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2152-620X * 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 26, Talalikhin str., 109316, Moscow, Russia e-mail: yu.kuzlyakina@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2152-620X * corresponding author
Замула Валентина Станиславовна — кандидат технических наук, ведущий инженер, Отдел «Технического регулирования», Федеральный научный центр пищевых систем им. В. М. Горбатова 109316, г. Москва, ул. Талалихина, 26 E-mail: v.zamula@fncps.ru 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 26, Talalikhin str., 109316, Moscow, Russia e-mail: v.zamula@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1634-1486
Кузнецова Оксана Александровна — доктор технических наук, директор, Федеральный научный центр пищевых систем им. В. М. Горбатова 109316, г. Москва, ул. Талалихина, 26 E-mail: o.kuznecova@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5048-9321	Oxana A. Kuznetsova , Doctor of Technical Sciences, Direktor, V. M. Gorbatov Federal Research Center for Food Systems 26, Talalikhin str., 109316, Moscow, Russia. E-mail: o.kuznecova@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5048-9321
Ребезов Максим Борисович — доктор сельскохозяйственных наук, профессор, главный научный сотрудник, Федеральный научный центр пищевых систем им. В. М. Горбатова РАН 109316, Москва, ул. Талалихина, 26 E-mail: rebezov@ya.ru 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 26, Talalikhin str., Moscow, 109316, Russia E-mail: rebezov@ya.ru ORCID: http://orcid.org/0000-0003-0857-5143
Петрунина Ирина Всеволодовна — старший научный сотрудник, Центр «Экономико-аналитических исследований и информационных технологий», Федеральный научный центр пищевых систем им. В. М. Горбатова 109316, Москва, ул. Талалихина, 26 E-mail: i.petrunina@fncps.ru 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 26, Talalikhin str., 109316, Moscow, Russia E-mail: i.petrunina@fncps.ru 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 109316, Москва, ул. Талалихина, 26 E-mail: n.gorbunova@fncps.ru 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 26, Talalikhin str., 109316, Moscow, Russia E-mail: n.gorbunova@fncps.ru ORCID: http://orcid.org/0000-0003-4249-9316
Критерии авторства	Contribution
Авторы в равных долях имеют отношение к написанию рукописи и одинаково несут ответственность за плагиат.	The authors has the sole responsible for writing the manuscript and es responsible levant for plagiarism.
Конфликт интересов	Conflict of interest
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.	The authors declare no conflict of interest.

DOI: <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-4-616-623>

Поступила 01.04.2025

Поступила после рецензирования 16.12.2025

Принята в печать 19.12.2025

© Зинина О. В., Чанов И. М., Ребезов М. Б., Ли Я., Ли Ч., Чжао И., 2025

<https://www.fsjour.com/jour>

Научная статья

Открытый доступ

ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ГИДРОЛИЗА КАЗЕИНА

Зинина О. В.^{1*}, Чанов И. М.¹, Ребезов М. Б.², Ли Я.³, Ли Ч.³, Чжао И.³¹Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), Челябинск, Россия²Федеральный научный центр пищевых систем им. В. М. Горбатова, Москва, Россия³Северо-Восточный сельскохозяйственный университет, Китай

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: АННОТАЦИЯ

казеин, степень
гидролиза, микробная
ферментация,
ацидофильная
палочка, уравнение
регрессии

Молочные белки являются ценным сырьем для получения белковых гидролизатов и активных пептидов, образуемых при гидролизе. Наиболее часто для проведения гидролиза используют различные протеолитические ферменты и бактерии. Важными параметрами регулирования степени гидролиза белков являются продолжительность, температура гидролиза и концентрация биологического агента. Целью исследований является установление оптимальных параметров гидролиза казеина химотрипсином и бактериальной закваской ацидофильной палочки. Для определения оптимальных условий процесса гидролиза использовали трехфакторный эксперимент. В ходе эксперимента варьировались три фактора: время гидролиза (от 6 до 26 ч) с шагом 10 ч; температура (от 32 до 42 °С) с шагом 5 °С; количество закваски (от 0,5 до 1,5 %) с шагом 0,5 %. Зависимой переменной являлась степень гидролиза. Содержание общего азота в казеине определяли методом Кельдаля, аминного азота — формальным титрованием. Влияние независимых переменных на зависимую переменную анализировали с помощью MathCAD, где также были построены поверхности отклика. Для полученных уравнений множественной регрессии определяли надежность уравнения по коэффициенту детерминации (R^2) и критерию Фишера (Fkr), статистическую значимость параметров уравнения множественной регрессии по критерию Стьюдента (t). Получено два уравнения регрессии процесса гидролиза казеина химотрипсином и бактериальной закваской. Установлены коэффициенты детерминации, подтверждающие высокую значимость моделей. Построены поверхности отклика, показывающие зависимость степени гидролиза от параметров гидролиза, установлены оптимальные параметры гидролиза ферментом химотрипсином (например, при продолжительности гидролиза 21,99 ч, температуре 43,3 °С, количестве фермента 0,02 % степень гидролиза составит 28,6 %) и закваской ацидофильной палочки (например, при продолжительности гидролиза 31,1 ч, температуре 35,8 °С, количестве закваски 1,5 % степень гидролиза составит 17,33 %). Таким образом, результаты проведенного многофакторного эксперимента позволили установить оптимальные параметры гидролиза для получения гидролизатов казеина химотрипсином и закваской ацидофильной палочки.

Received 01.04.2025

Accepted in revised 16.12.2025

Accepted for publication 19.12.2025

© Zinina O. V., Chanov I. M., Rebezov M. B., Li Y., Li Ch., Zhao Y., 2025

Available online at <https://www.fsjour.com/jour>

Original scientific article

Open access

OPTIMIZATION OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF CASEIN HYDROLYSIS

Oksana V. Zinina^{1*}, Ilya M. Chanov¹, Maksim B. Rebezov², Yang Li³, Chun Li³, Yingying Zhao³¹South Ural State University, Chelyabinsk, Russia²V. M. Gorbатов Federal Research Center for Food Systems, Moscow, Russia³Northeast Agricultural University, China

KEYWORDS:

casein, degree of
hydrolysis, microbial
fermentation,
acidophilus bacillus,
regression equation

ABSTRACT

Milk proteins are valuable raw materials for obtaining protein hydrolysates and active peptides formed during hydrolysis. Various proteolytic enzymes and bacteria are most often used for hydrolysis. Important parameters for regulating the degree of protein hydrolysis are duration, temperature of hydrolysis and concentration of a biological agent. The aim of the study was to establish optimum parameters for casein hydrolysis with chymotrypsin and bacterial starter of acidophilus bacillus. A three-factor experiment was used to determine optimum conditions for the hydrolysis process. Three factors were varied during the experiment: hydrolysis time (from 6 to 26 h) with a step of 10 h; temperature (from 32 to 42 °C) with a step of 5 °C; starter amount (from 0.5 to 1.5 %) with a step of 0.5 %. The dependent variable was the degree of hydrolysis. The content of total nitrogen in casein was determined by the Kjeldahl method, and that of amine nitrogen was determined by formol titration. The influence of independent variables on the dependent variable was analyzed using MathCAD, where response surfaces were also constructed. For the obtained multiple regression equations, the authors determined the reliability of the equation by the determination coefficient (R^2) and Fisher's criterion (Fkr), and the statistical significance of the parameters of the multiple regression equation by the Student's criterion (t). Two regression equations were obtained for the process of casein hydrolysis with chymotrypsin and bacterial starter. Determination coefficients were established, confirming the high significance of the models. Response surfaces were constructed showing the dependence of the hydrolysis degree on the hydrolysis parameters. The optimum parameters of hydrolysis with the enzyme chymotrypsin and acidophilus starter were established. For example, when using chymotrypsin with a hydrolysis duration of 21.99 h, a temperature of 43.3 °C, and an enzyme amount of 0.02 %, the hydrolysis degree will be 28.6 % and when using acidophilus starter with a hydrolysis duration of 31.1 h, a temperature of 35.8 °C, and an amount of starter of 1.5 %, the hydrolysis degree will be 17.33 %. Thus, the results of the multifactorial experiment made it possible to establish the optimum hydrolysis parameters for obtaining casein hydrolysates with chymotrypsin and acidophilus starter.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Зинина, О. В., Чанов, И. М., Ребезов, М. Б., Ли, Я., Ли, Ч., Чжао, И. (2025). Оптимизация технологических параметров гидролиза казеина. *Пищевые системы*, 8(4), 616–623. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-4-616-623>

FOR CITATION: Zinina, O. V., Chanov, I. M., Rebezov, M. B., Li, Y., Li, Ch., Zhao, Y. (2025). Optimization of technological parameters of casein hydrolysis. *Food Systems*, 8(4), 616–623. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-4-616-623>

1. Введение

Молочное сырье является богатым источником белков и перспективным субстратом для получения биоактивных пептидов.

Биоактивные пептиды — это органические вещества, состоящие из аминокислот, соединенных пептидными (амидными) связями, выполняющие различные функции в живых организмах или клетках. Большинство биоактивных пептидов имеют диапазон от 2 (дипептиды) до 20 аминокислотных остатков с молекулярной массой 0,4–2 кДа. Они обычно высвобождаются при гидролизе белка (протеазой или кислотнo-щелочной обработкой), желудочно-кишечном пищеварении *in vivo* и микробной ферментации и обладают различной биологической активностью. Хотя некоторые пептиды существуют в чистом виде, многие из них скрыты в неповрежденной структуре белковых молекул. В большинстве случаев в состав биологически активных пептидных цепей входят пролин, аргинин и лизин, а также гидрофобные остатки. Пептиды с молекулярной массой менее 1 кДа относят к малым пептидам (олигопептидам), с молекулярной массой 1–5 кДа — к полипептидам, с молекулярной массой 5–10 кДа — к большим пептидам, тогда как соединения с молекулярной массой более 10 кДа, как правило, классифицируются как белки [1]. С точки зрения структуры биоактивные пептиды делятся на два основных типа: эндогенные и экзогенные. Эндогенные пептиды вырабатываются в различных типах клеток, в частности в нервных клетках (анальгетического и опиоидного действия) и иммунных клетках (участвующих в процессах воспаления и антимикробной активности), а также в различных железах организма, таких как гипофиз и надпочечники. Экзогенные пептиды поступают в организм из внешних источников, включая пищу, пищевые добавки и лекарственные средства [2].

Эксперименты подтвердили, что биоактивные пептиды обладают антиоксидантным, антибактериальным, противовирусным, противораковым, гипотензивным, гиполипидемическим, нейромодуляторным и иммунорегулирующим действием [1,3]. Биоактивные пептиды более активны, чем нативные белки. Пептиды легко усваиваются, более биодоступны и менее аллергенны, чем белки. Исследования показали, что пептиды влияют на многие важные физиологические функции в организме. В настоящее время известно более 100 эндогенных биоактивных пептидов, участвующих в регуляции физиологических функций организма человека, включая рост и дифференциацию клеток, клеточный метаболизм, гормональную и иммунную регуляцию, эндокринные процессы, а также процессы, связанные с подавлением опухолевых поражений [4]. Благодаря совокупности биологических и функциональных свойств биоактивные пептиды рассматриваются как важные ингредиенты функциональных продуктов питания, нутрицевтиков и фармацевтических препаратов [5].

Методы получения биоактивных пептидов включают ферментативный гидролиз и микробную ферментацию. Ферментативный гидролиз — это процесс, в котором белковые вещества генерируют аминокислоты и пептиды под каталитическим действием протеаз [6]. Ферментативный метод получения биоактивных пептидов имитирует процесс деградации белков в человеческом организме *in vitro*. К наиболее часто используемым промышленным протеазам относятся пепсин, кислая протеаза, нейтральная протеаза, щелочная протеаза, трипсин и химотрипсин, коллагеназа, папаин, бромелаин и сложные ферментные препараты [7,8].

Исследования показали, что гидролиз белков молока пищеварительными ферментами может приводить к образованию биологически активных пептидов [9]. Например, сывороточный белок может быть переварен трипсином в кишечнике с образованием пептидов с ингибирующей АПФ-активностью. Установлено, что гидролизат казеина обладает более высокой ингибирующей АПФ-активностью, чем ферментативный гидролизат сывороточного протеина [10]. Для гидролиза молочных белков наиболее часто применяют химотрипсин, пепсин и трипсин, по отдельности или в комбинации [11,12]. Иногда для имитации желудочно-кишечного пищеварения протеазы, такие как щелочная протеаза, термолизин и субтилизин, используются в непрерывном процессе вместе с пепсином и трипсином для высвобождения различных биоактивных пептидов [10].

По сравнению с ферментативным гидролизом белкового субстрата одним ферментом с определенной специфичностью обработка микроорганизмами имеет определенные преимущества. Микроорганизмы, обладая широкими метаболическими возможностями, проявляют не только способность к синтезу широкого спектра биологически активных соединений в ходе процесса ферментации, но и выступают в роли высокоэффективных биокатализаторов для модификации экзогенных молекул. Вырабатываемые клеткой эн-

догенные метаболиты участвуют в процессах селективной биотрансформации белкового субстрата. Результатом биокаталитических процессов является не просто изменение структуры субстрата, но и зачастую существенное повышение его биологической активности [13,14]. Некоторые микроорганизмы способны гидролизовать молочные белки до пептидов и аминокислот, которые служат источниками азота для их роста. Пептиды, высвобождаемые в результате гидролиза, можно разделить и очистить с помощью ультрафильтрации или разделения на молекулярных ситах, а аминокислотную последовательность биоактивных пептидов можно определить с помощью хроматографических методов [15,16]. Существует много сообщений о высвобождении различных биоактивных пептидов посредством микробного гидролиза молочного белка [17]. Штаммы *Lactobacillus helveticus* способны высвобождать антигипертензивные пептиды, наиболее заметными из которых являются трипептиды, ингибирующие АПФ: Leu-Pro-Pro (LPP), Val-Pro-Pro (VPP) и Ile-Pro-Pro (IPP), антигипертензивные свойства которых были продемонстрированы на нескольких моделях крыс и в исследованиях с участием человека [18]. Ферментация коровьего молока с *Enterococcus faecalis* приводит к образованию антигипертензивных казеиновых пептидов LHLPLP и HLPLP [19]. Также показано, что бактерии в йогурте, заквасках для сыра и имеющихся в продаже пробиотиках производят различные биоактивные пептиды в коровьем молоке в процессе ферментации [20].

Основной белок молока казеин, составляющий 80 % от белковых веществ, является хорошим субстратом для получения белковых гидролизатов с биоактивными свойствами [21]. Казеиновая группа белков характеризуется уникальными физико-химическими свойствами и структурой, предопределяющей ее особенности метаболизма в желудочно-кишечном тракте. Казеин относится к классу медленно гидролизующихся белков, отличительной чертой которых является замедленное высвобождение аминокислот и пептидов в процессе пищеварения. Данное явление связано со спецификой формирования казеиновых мицелл и с их устойчивостью к соляной кислоте в желудке, а также с особенностями действия протеаз на казеиновые субстраты. Свойство пролонгированного высвобождения обуславливает значительные антикатаболические эффекты казеина. В условиях длительного пищеварения, когда казеиновые мицеллы постепенно расщепляются, происходит непрерывное поступление аминокислот и пептидов в кровяное русло [22]. Данный процесс, в свою очередь, ингибирует протеолитическую деградацию эндогенных белков и мышечной ткани, что делает казеин ценным нутриентом в условиях повышенных метаболических нагрузок, например, при занятиях спортом или в период восстановления после заболеваний [23].

Благодаря использованию процессов ферментации и направленного ферментативного гидролиза, казеин может быть подвергнут целенаправленной деградации. Данные биотехнологические методы позволяют контролируемо расщеплять полипептидные цепи казеина, трансформируя исходный белок в казеиновые гидролизаты. В зависимости от используемого протеолитического фермента, условий гидролиза (pH, температура, время, концентрации фермента) и степени гидролиза, образуются сложные смеси пептидов с различными молекулярными массами и функциональными свойствами [24].

Более того, последние достижения в области протеолитической энзимологии и биоинформатики позволяют не только получать казеиновые гидролизаты с заданным профилем аминокислотного состава, но и выделять из них специфические биоактивные пептидные фракции. Эти пептиды, часто образующиеся при энзиматическом расщеплении определенных участков казеиновой молекулы, обладают потенциальной биологической активностью, включая антигипертензивное, антиоксидантное, иммуномодулирующее и антимикробное действие (например, казоморфины). Таким образом, казеин выступает не только как источник медленно высвобождающихся аминокислот, но и как про-источник для получения целого спектра функциональных биоактивных молекул [25].

В исследованиях российских ученых подтверждена высокая протеолитическая активность штамма *Lactobacillus acidophilum*. Данные бактерии из пятнадцати изученных штаммов молочнокислых бактерий рода *Lactobacillus* образовывали максимальную зону просветления, показывающую высокий уровень пептизации казеина [26].

Таким образом, ферментативный гидролиз считается перспективным подходом к повышению усвояемости и снижению аллергенности молочного белка. Однако при глубоком гидролизе образуются простые пептиды и свободные аминокислоты, обладающие горьким вкусом, что ограничивает использование таких гидролизатов в производстве продуктов питания. Поэтому в процессе гидролиза важным контролируемым параметром является его степень [27,28].

На степень гидролиза влияет множество факторов: состав исходного субстрата, выбранный биологический агент и его концентрация, условия (рН среды, продолжительность и температура гидролиза) [29]. Таким образом, для достижения заданной степени гидролиза устанавливаются наиболее важные для конкретного случая параметры процесса.

Целью исследований является установление оптимальных параметров гидролиза казеина химотрипсином и бактериальной заквасочной ацидофильной палочки.

2. Объекты и методы

Объектом исследования являлся молочный белок казеин, полученный при сычужном свертывании обезжиренного молока (0,05 % жирности). Для этого использовали сычужный фермент (95 % химозин, 5 % говяжий пепсин; Chr. Hansen, Дания) из расчета 20 мл на 100 л молока. После образования сгустка казеина его отделяли от сыворотки процеживанием через лавсан и отжимом для максимального удаления влаги.

Перед проведением гидролиза казеина был установлен его химический состав по общепринятым методам: массовая доля белка по ГОСТ Р 51470-99¹, массовая доля влаги по ГОСТ Р 51464-99², массовая доля жира по ГОСТ 31689-2012³, массовая доля золы по ГОСТ Р 51463-99⁴.

Для ферментативного гидролиза казеина использовали закваску «Ацидофилин» («БакЗдрав», Москва, Россия), содержащую *Lactobacillus Acidophilus* и *Streptococcus thermophilus*. Перед использованием было установлено количество бактерий в 1 г закваски посевом на сухую питательную среду для определения общего микробного числа «Петритест» (НПО «Альтернатива», Россия) с последующей выдержкой в термостате при $37 \pm 1^\circ\text{C}$ в течение 36 ч. Количество бактерий составило $2 \cdot 10^8$ КОЕ/г. Также для гидролиза использовали фермент химотрипсин (ООО «Самсон-Мед», Россия).

Выбор фермента обоснован результатами предварительных исследований *in silico*, проведенных с помощью базы данных PeptideCutter, которая прогнозирует возможные точки расщепления в данной белковой последовательности, полученной из базы данных белков UniProtKB, энзимами. Также использовалась белковая база BIOPEP-UWM.

К полученному казеину добавляли дистиллированную воду в соотношении 1:5 и гомогенизировали в течение 1 мин гомогенизатором Stegler DG-360 (компания Stegler, Китай). При подготовке опытных образцов в полученные гомогенаты добавляли закваску в количестве 0,5, 1,0 и 1,5 % к массе казеина и тщательно перемешивали. Контрольный образец гомогената не содержал закваски. Гомогенаты подвергали ферментативному гидролизу в термостате ТВ-20-ПЗ-К (Касимовский ПЗ, Россия) в течение 6, 16 и 26 ч при температурах 32, 37 и 42°C .

Для определения оптимальных условий процесса гидролиза использовали трехфакторный эксперимент. В ходе эксперимента варьировались три фактора: X_1 — время гидролиза (от 6 до 26 ч) с шагом 10 ч; X_2 — температура (от 32 до 42°C) с шагом 5°C ; X_3 — количество закваски (от 0,5 до 1,5 %) с шагом 0,5 %. Зависимой переменной являлась степень гидролиза (СГ, %), которую рассчитывали по формуле:

$$CG = \left(\frac{N_{AA} - N_{AA0}}{N_{OA} - N_{AA0}} \right) \times 100\% \quad (1),$$

где N_{OA} — содержание общего азота в казеине, %; N_{AA0} — аминный азот в негидролизованном казеине, %; N_{AA} — содержание аминного азота в гидролизате после ферментации в течение определенного времени, %.

Содержание общего азота в казеине определяли методом Кельдаля по ГОСТ 23327-98⁵, аминного азота — формальным титрованием согласно ОФС.1.2.3.0022.15⁶.

Влияние независимых переменных на зависимую переменную (СГ) анализировали с помощью MathCAD (PTC: order #2456861 #2497812), где также были построены поверхности отклика. В общем

виде уравнение трехфакторного эксперимента выглядит следующим образом:

$$Y = b_0 + b_1 \cdot X_1 + b_2 \cdot X_2 + b_3 \cdot X_3 + b_{12} \cdot X_1 \cdot X_2 + b_{13} \cdot X_1 \cdot X_3 + b_{23} \cdot X_2 \cdot X_3 + b_{123} \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 + b_{11} \cdot X_1^2 + b_{22} \cdot X_2^2 + b_{33} \cdot X_3^2. \quad (2)$$

Определяли следующие показатели полученного уравнения множественной регрессии: коэффициенты регрессии, надежность уравнения по коэффициенту детерминации (R^2) и критерию Фишера (F_{kr}), статистическую значимость параметров уравнения множественной регрессии по критерию Стьюдента (t). Для оценки обоснованности включения независимых переменных в регрессионную модель рассчитывали частный коэффициент корреляции (β).

Каждое измерение проводили трехкратно. Значения вероятности $p \leq 0,05$ приняты для указания статистической значимости. Для статистической обработки экспериментальных данных использовали однофакторный дисперсионный анализ и тест Тьюки.

3. Результаты и обсуждение

При ферментативном гидролизе молочных белков получают гидролизаты с разной степенью гидролиза, от которой зависят их свойства [30,31]. Степень гидролиза представляет собой количественную характеристику, отражающую долю расщепленных пептидных связей в молекуле белкового субстрата в результате протеолитического расщепления. Она служит ключевым параметром при описании кинетики ферментативного гидролиза и напрямую коррелирует с молекулярно-массовым распределением пептидов, с функциональными свойствами гидролизата и с его биологической активностью.

На степень гидролиза оказывают влияние следующие основные факторы:

- время гидролиза — при прочих равных условиях степень гидролиза обычно повышается монотонно с увеличением продолжительности процесса, но возможны и обратимые явления при инактивации фермента или значительном накоплении ингибирующих продуктов;
- рН среды — определяет ионизацию активных центров фермента и субстрата, формирует оптимумы активности для конкретной протеазы; отклонение от оптимального рН снижает скорость реакции и может приводить к изменению профиля пептидов;
- концентрация фермента — увеличение количества каталитических центров обычно ускоряет расщепление и повышает степень гидролиза, однако при недостатке субстрата или при насыщении эффект нивелируется;
- температура реакции — влияет на кинетику (увеличение температуры ускоряет скорость до тех пор, пока не наступает тепловая инактивация фермента); для каждого фермента и другого биологического агента существует оптимальная температура;
- ионная сила и состав ионов в буфере — влияют на стабилизацию третичной структуры белка и фермента, на доступность сайтов расщепления и на электростатические взаимодействия между ферментом и субстратом;
- наличие специфических ингибиторов или активаторов, а также концентрация продуктов гидролиза, которые могут осуществлять обратное ингибирование [32].

При проведении исследований *in silico* выявлены идентификаторы фракций казеина (α 1-казеин — P04653, α 2-казеин — P04654, β -казеин — P11839, κ -казеин — P02669) и следующие протеолитические ферменты с наибольшим количеством расщеплений фракций казеина: протеиназа К, термолитин, пепсин, трипсин и химотрипсин. В Таблице 1 приведен перечень пептидов, образуемых при действии химотрипсина на различные фракции казеина, в Таблице 2 представлены биоактивные пептиды из данных фракций казеина.

Представленные результаты, полученные методом *in silico*, показывают высокий потенциал гидролизатов казеина как источника различных биоактивных пептидов.

Помимо повышения биодоступности фракций казеина благодаря расщеплению на более простые белковые молекулы, способные быстро всасываться в желудочно-кишечном тракте, показано снижение антигенных свойств данного белка. Проведенные исследования гидролизатов казеина, полученных ферментативным гидролизом такими ферментами, как трипсин, химотрипсин и термолитин, показали, что наибольшую эффективность в снижении антигенных свойств продемонстрировал химотрипсин [33].

Также следует отметить, что применение методов *in silico* при проведении ферментативного гидролиза является неотъемлемой частью при получении белковых гидролизатов и биоактивных пептидов [34,35].

¹ ГОСТ Р 51470-99 «Казеины и казеинаты. Метод определения массовой доли белка». М.: Стандартинформ, 2014. — 8 с

² ГОСТ Р 51464-99 «Казеины и казеинаты. Метод определения массовой доли влаги». М.: Стандартинформ, 2014. — 6 с

³ ГОСТ 31689-2012 «Казеин. Технические условия». М.: Стандартинформ, 2014. — 19 с

⁴ ГОСТ Р 51463-99 «Казеины сычужные и казеинаты. Метод определения массовой доли золы». М.: Стандартинформ, 2018. — 7 с

⁵ ГОСТ 23327-98 «Молоко и молочные продукты. Метод измерения массовой доли общего азота по Кельдалю и определение массовой доли белка». М.: Стандартинформ, 2009. — 11 с

⁶ ОФС.1.2.3.0022.15 «Определение аминного азота методами формального и йодометрического титрования»

Таблица 1. Описание действия фермента химотрипсин на фракции казеина по данным базы данных PeptideCutter
Table 1. Description of the action of the enzyme chymotrypsin on casein fractions according to the data of the PeptideCutter database

Белок	Результат действия фермента	Расположение высвобождаемых пептидов
αs1-казеин	RP – KHP – IKHQ – GL – P – Q – P – FP – Q – VFGKE – KVN – E – L – SKDIGSE – STE – DQ – AM – E – DIKE – M – E – AE – SISSE – E – IVP – N – SVE – Q – KHIQ – KE – DVP – SE – RY – L – GY – L – E – Q – L – L – RL – KKY – KVP – Q – L – E – IVP – N – SAE – E – RL – HSM – KQ – GIHAQ – Q – KE – P – M – IGVN – Q – E – L – AY – FY – P – E – L – FRQ – FY – Q – L – DAY – P – SGAW – Y – Y – VP – L – GTQ – Y – TDAP – SFSDIP – N – P – IGSE – N – SE – KTTM – P – L – W	[1–2],[3–5],[6–9],[10–11],[12–12],[13–13],[14–14],[15–16],[17–17],[18–22],[23–25],[26–26],[27–27],[28–34],[35–37],[38–39],[40–41],[42–42],[43–46],[47–47],[48–48],[49–50],[51–56],[57–57],[58–60],[61–61],[62–64],[65–65],[66–69],[70–71],[72–74],[75–76],[77–78],[79–79],[80–81],[82–82],[83–83],[84–84],[85–85],[86–86],[87–88],[89–91],[92–94],[95–95],[96–96],[97–97],[98–100],[101–101],[102–104],[105–105],[106–107],[108–110],[111–112],[113–117],[118–118],[119–120],[121–121],[122–122],[123–126],[127–127],[128–128],[129–129],[130–131],[132–133],[134–134],[135–135],[136–136],[137–139],[140–141],[142–142],[143–143],[144–146],[147–147],[148–151],[152–152],[153–153],[154–155],[156–156],[157–159],[160–160],[161–164],[165–170],[171–171],[172–172],[173–176],[177–177],[178–179],[180–183],[184–184],[185–185],[186–186]
αs2-казеин	M – KFFIFTCL – L – AVAL – AKN – TM – E – HVSSSE – E – SIISQ – E – TY – KQ – E – KN – M – AIN – P – SKE – N – L – CSTFCKE – VVRN – AN – E – E – E – Y – SIGSSSE – E – SAE – VATE – E – VKITVDDKHY – Q – KAL – N – E – IN – Q – FY – Q – KFP – Q – Y – L – Q – Y – L – Y – Q – GP – IVL – N – P – W – DQ – VKRN – AVP – ITP – TL – N – RE – Q – L – STSE – E – N – SKKTVDN – E – STE – VFTKKTCL – TE – E – E – KN – RL – N – FL – KKISQ – RY – Q – KFAL – P – Q – Y – L – KTVY – Q – HQ – KAM – KP – W – IQ – P – KTKVIP – Y – VRY – L	[1–1],[2–9],[10–10],[11–14],[15–17],[18–19],[20–20],[21–26],[27–27],[28–32],[33–33],[34–35],[36–37],[38–38],[39–40],[41–41],[42–44],[45–45],[46–48],[49–49],[50–50],[51–57],[58–61],[62–63],[64–64],[65–65],[66–66],[67–67],[68–74],[75–75],[76–78],[79–82],[83–83],[84–93],[94–94],[95–97],[98–98],[99–99],[100–101],[102–102],[103–104],[105–105],[106–108],[109–109],[110–110],[111–111],[112–112],[113–113],[114–114],[115–115],[116–116],[117–118],[119–121],[122–122],[123–123],[124–124],[125–126],[127–130],[131–133],[134–136],[137–138],[139–139],[140–141],[142–142],[143–143],[144–147],[148–148],[149–149],[150–156],[157–157],[158–160],[161–168],[169–170],[171–171],[172–172],[173–174],[175–176],[177–177],[178–179],[180–184],[185–186],[187–187],[188–191],[192–192],[193–193],[194–194],[195–195],[196–199],[200–200],[201–202],[203–205],[206–207],[208–208],[209–210],[211–211],[212–217],[218–218],[219–221],[222–222]

Таблица 2. Биоактивные пептиды, образуемые при расщеплении фракций казеина химотрипсином, установленные с помощью базы BIOPEP-UWM

Table 2. Bioactive peptides formed upon decomposition of the casein fractions with chymotrypsin determined using the BIOPEP-UWM database

Биоактивные пептиды при расщеплении αs1-казеина		Биоактивные пептиды при расщеплении αs2-казеина	
Активность	Пептиды	Активность	Пептиды
ингибитор дипептидилпептидазы IV	VP, FP, RP, GL, AE, AY, DQ, GY, KE, KE, RL	ингибитор дипептидилпептидазы IV	GP, KP, FL, DQ, IN, IQ, RL, TE, TL, TM, TY
ингибитор АПФ	RL, RY, FP, GY, FY, AY, RP, VP, GL, KE	ингибитор АПФ	RL, AVP, RY, FY, GP, KP, TE, VRY
антиоксидантная	AY, KKY, RY, FY	антиоксидантная	KP, TY, RY, FY
стимулирующая	SE	регулирующая	GP
нейропептид	RP	антитромботическая	GP
ингибитор нейролизина	RP	противоамнестическая	GP
ингибитор альфа-амилазы	FY	ингибитор альфа-амилазы	FY
ингибитор альфа-глюкозидазы	FY	ингибитор альфа-глюкозидазы	FY
гипотензивная	FY	гипотензивная	FY
ингибитор тубулин-тирозинлигазы	AY	гипоурикемическая	TL
ингибитор глутаматкарбоксипептидазы II	AE	ингибитор дипептидилпептидазы III	FL
ингибитор трипептидилпептидазы II	GY	ингибитор неприлизина	GP
ингибитор неприлизина	AE, RP	—	—

Перед проведением ферментативного гидролиза методом *in vitro* химотрипсином и закваской ацидофильной палочки у исследуемого казеина определен общий химический состав (%): влажность — 57,49±0,86; содержание белка — 34,53±0,41; содержание жира — 0,17±0,01; содержание золы — 2,1±0,08.

В литературе отмечено, что проведение гидролиза белка при установленных оптимальных параметрах процесса, таких как температура, pH, концентрация фермента по отношению к субстрату, время гидролиза и ионная сила, способствует получению гидролизатов с прогнозируемыми свойствами. Также необходимо подбирать протеолитический фермент с высокой гидролитической способностью для используемого субстрата [36]. При выборе микроорганизмов для микробной ферментации также рекомендуется учитывать субстратную специфичность и уровень протеолитической активности [37]. Для оптимизации процесса ферментативного гидролиза часто используют метод поверхности отклика (Response Surface Methodology, RSM) [38].

Для определения оптимальных значений независимых переменных использовали уравнение множественной регрессии с построением матрицы планирования центрального композиционного ортогонального плана (Таблицы 3 и 5) и методологию поверхности отклика. Изменение переменной — степени гидролиза ($CG_{\text{бс}}$ и $CG_{\text{л}}$) — оценивали под действием трех факторов: продолжительности гидролиза (X_1), температуры (X_2), количества закваски (X_3). Всего в данной модели предусмотрено проведение 15 экспериментов.

Таблица 3. Матрица планирования центрального композиционного ортогонального плана ферментации казеина бактериальной закваской

Table 3. Design matrix for a central composite orthogonal design for casein fermentation with bacterial starter

Номер эксперимента	X_1	X_2	X_3	Y
1	6 (–1)	32 (–1)	0,5 (–1)	4,76
2	6 (–1)	42 (1)	0,5 (–1)	8,90
3	6 (–1)	32 (–1)	1,5 (1)	7,87
4	6 (–1)	42 (1)	1,5 (1)	13,04
5	26 (1)	32 (–1)	0,5 (–1)	10,90
6	26 (1)	42 (1)	0,5 (–1)	12,01
7	26 (1)	32 (–1)	1,5 (1)	16,15
8	26 (1)	42 (1)	1,5 (1)	19,25
9	16 (0)	37 (0)	1 (0)	8,88
10	31,6 (1,2154)	37 (0)	1 (0)	18,79
11	4,7 (–1,2154)	37 (0)	1 (0)	2,73
12	16 (0)	51,1 (1,2154)	1 (0)	0,68
13	16 (0)	25,1 (–1,2154)	1 (0)	6,85
14	16 (0)	37 (0)	1,8 (1,2154)	13,53
15	16 (0)	37 (0)	0,4 (–1,2154)	5,86

В результате оптимизации получено уравнение множественной регрессии для процесса гидролиза казеина закваской с ацидофильной палочкой:

$$CG_{\text{об}} = -8,456 + 0,345X_1 + 0,567X_2 + 3,789X_3 - 0,006X_1^2 - 0,004X_2, \quad (3)$$

где X_1 — продолжительность гидролиза, ч; X_2 — температура, °C; X_3 — количество закваски, %.

Статистическая значимость коэффициентов уравнения $X_1, X_2, X_3, X_1^2, X_2^2$ ($p < 0,05$) подтверждена критерием Стьюдента. Значение максимального частного коэффициента корреляции показало, что факторы X_2 и X_3 оказывают наиболее существенное влияние на гидролиз (Таблица 4). Коэффициент детерминации $R^2 = 0,995$ показывает высокую значимость модели.

Таблица 4. Результаты статистического анализа коэффициентов регрессии для независимых переменных (X_j) при гидролизе казеина бактериальной закваской

Table 4. Results of the statistical analysis of the regression coefficients for independent variables (X_j) upon hydrolysis of casein with bacterial starter

Переменные	Коэффициент регрессии (b)	Критерий Стьюдента	Значение вероятности (p)
const	-8,456	-1,852	0,135 $p > 0,05$
X_1	0,345	4,423	0,011 $p \leq 0,05$
X_2	0,567	3,000	0,040 $p \leq 0,05$
X_3	3,789	4,012	0,016 $p \leq 0,05$
$X_1 \cdot X_2$	0,012	1,500	0,208 $p > 0,05$
$X_1 \cdot X_3$	-0,023	-1,000	0,374 $p > 0,05$
$X_2 \cdot X_3$	0,034	1,214	0,291 $p > 0,05$
$X_1 \cdot X_2 \cdot X_3$	-0,001	-1,000	0,374 $p > 0,05$
X_1^2	-0,006	-3,000	0,040 $p \leq 0,05$
X_2^2	-0,004	-4,000	0,016 $p \leq 0,05$
X_3^2	-0,789	-2,287	0,084 $p > 0,05$

На 3D-поверхности отклика зависимая переменная фиксировалась на центральном уровне (ось Z), а влияние двух независимых переменных на отклик фиксировалось на осях Y и X (Рисунок 1).

Согласно разработанным моделям поверхностей отклика установлены оптимальные значения факторов для гидролиза казеина бактериальной закваской:

- при продолжительности гидролиза 31,1 ч, температуре 35,8 °C, количестве закваски 1,5 % степень гидролиза составит 17,33 %;
- при продолжительности гидролиза 9 ч, температуре 38,2 °C, количестве закваски 1,97 % степень гидролиза составит 17,45 %;
- при продолжительности гидролиза 25,3 ч, температуре 37 °C, количестве закваски 1,32 % степень гидролиза составит 16,94 %.

В результате оптимизации получено уравнение множественной регрессии для процесса гидролиза казеина химотрипсином:

$$CG_x = -12,345 + 0,567X_1 + 0,789X_2 + 5,678X_3 - 0,012X_1^2 \quad (4)$$

где X_1 — продолжительность гидролиза, ч; X_2 — температура, °C; X_3 — количество химотрипсина, %.

Таблица 5. Матрица планирования центрального композиционного ортогонального плана ферментации казеина химотрипсином

Table 5. Design matrix for a central composite orthogonal design for casein fermentation with chymotrypsin

Номер эксперимента	X_1	X_2	X_3	Y
1	3 (-1)	34 (-1)	0,01 (-1)	6,47
2	3 (-1)	40 (1)	0,01 (-1)	2,04
3	3 (-1)	34 (-1)	0,02 (1)	10,55
4	3 (-1)	40 (1)	0,02 (1)	11,58
5	9 (1)	34 (-1)	0,01 (-1)	10,21
6	9 (1)	40 (1)	0,01 (-1)	9,87
7	9 (1)	34 (-1)	0,02 (1)	14,29
8	9 (1)	40 (1)	0,02 (1)	17,7
9	6 (0)	37 (0)	0,015 (0)	15,32
10	10,9 (1,2154)	37 (0)	0,015 (0)	34,05
11	2,4 (-1,2154)	37 (0)	0,015 (0)	8,51
12	6 (0)	48,6 (1,2154)	0,015 (0)	21,1
13	6 (0)	26,7 (-1,2154)	0,015 (0)	7,49
14	6 (0)	37 (0)	0,024 (1,2154)	17,02
15	6 (0)	37 (0)	0,008 (-1,2154)	16,68

Статистическая значимость коэффициентов уравнения X_1, X_2, X_3, X_1^2 ($p < 0,05$) подтверждена критерием Стьюдента. Значение максимального частного коэффициента корреляции показало, что факторы X_1 и X_3 оказывают наиболее существенное влияние на гидролиз (Таблица 6). Коэффициент детерминации $R^2 = 0,998$ показывает высокую значимость модели.

Таблица 6. Результаты статистического анализа коэффициентов регрессии для независимых переменных (X_j) при гидролизе казеина химотрипсином

Table 6. Results of the statistical analysis of the regression coefficients for independent variables (X_j) upon hydrolysis of casein with chymotrypsin

Переменные	Коэффициент регрессии (b)	Критерий Стьюдента	Значение вероятности (p)
const	-12,345	-2,175	0,096 $p > 0,05$
X_1	0,567	4,609	0,010 $p \leq 0,05$
X_2	0,789	3,371	0,028 $p \leq 0,05$
X_3	5,678	4,601	0,010 $p \leq 0,05$
$X_1 \cdot X_2$	0,023	1,917	0,128 $p > 0,05$
$X_1 \cdot X_3$	-0,045	-1,324	0,256 $p > 0,05$
$X_2 \cdot X_3$	0,067	1,489	0,212 $p > 0,05$
$X_1 \cdot X_2 \cdot X_3$	-0,001	-1,000	0,374 $p > 0,05$
X_1^2	-0,012	-3,000	0,040 $p \leq 0,05$
X_2^2	-0,008	-2,667	0,056 $p > 0,05$
X_3^2	-1,234	-2,176	0,095 $p > 0,05$

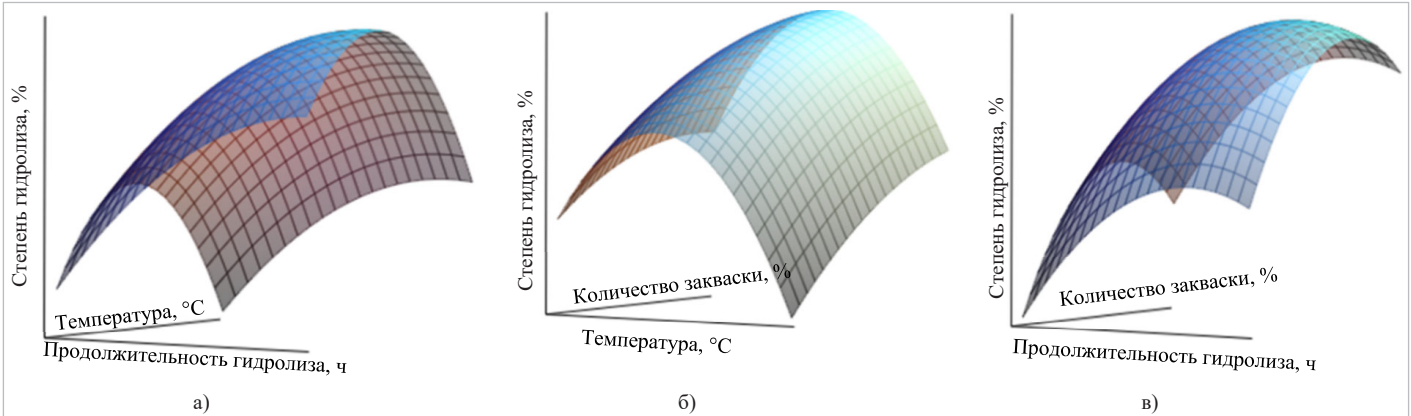


Рисунок 1. Трехмерные поверхности отклика зависимости степени гидролиза казеина бактериальной закваской от факторов: а) продолжительности гидролиза и температуры; б) температуры и количества закваски; в) продолжительности гидролиза и количества закваски

Figure 1. Three-dimensional response surfaces of the dependence of the degree of casein hydrolysis with bacterial starter on factors: а) duration of hydrolysis and temperature, б) temperature and an amount of starter; в) duration of hydrolysis and an amount of starter

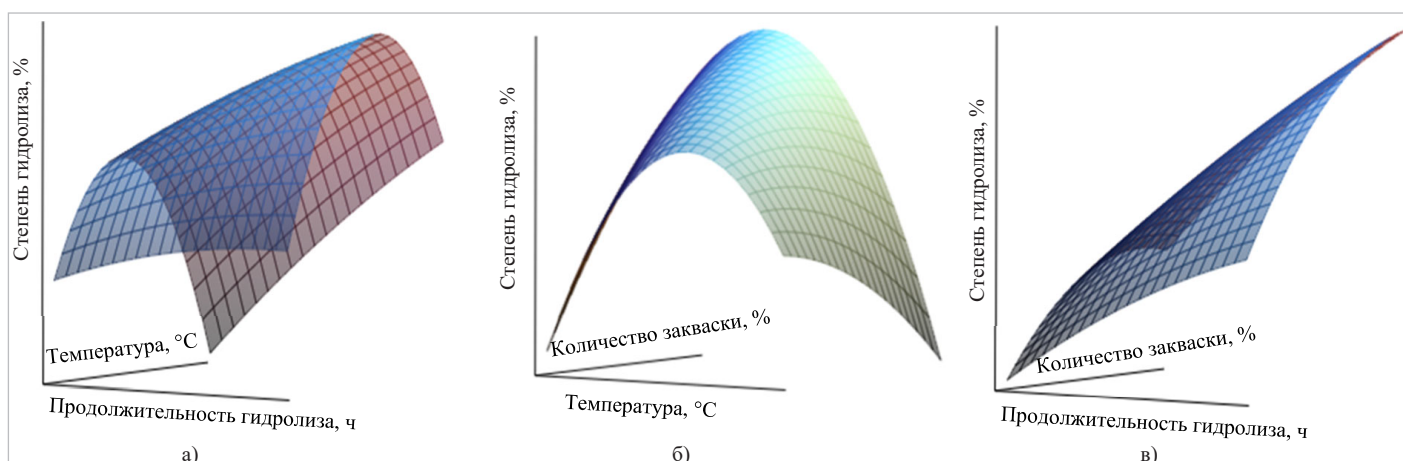


Рисунок 2. Трехмерные поверхности отклика зависимости степени гидролиза казеина химотрипсином от факторов: а) продолжительности гидролиза и температуры; б) температуры и количества закваски; в) продолжительности гидролиза и количества закваски

Figure 2. Three-dimensional response surfaces of the dependence of the degree of casein hydrolysis with chymotrypsin on factors: а) duration of hydrolysis and temperature, б) temperature and an amount of starter; в) duration of hydrolysis and an amount of starter

На 3D-поверхности отклика степень гидролиза при ферментации казеина химотрипсином фиксировалась на центральном уровне (ось Z), а влияние двух независимых переменных на отклик фиксировалось на осях Y и X (Рисунок 2).

Согласно разработанным моделям поверхностей отклика установлены оптимальные значения факторов при гидролизе казеина химотрипсином:

- при продолжительности гидролиза 21,99 ч, температуре 43,3 °C, количестве фермента 0,02 % степень гидролиза составит 28,6 %;
- при продолжительности гидролиза 9 ч, температуре 37,2 °C, количестве фермента 0,036 % степень гидролиза составит 21,3 %;
- при продолжительности гидролиза 29,4 ч, температуре 34 °C, количестве фермента 0,025 % степень гидролиза составит 20,9 %.

Результаты исследований показали, что наибольшее влияние на степень гидролиза при ферментации как химотрипсином, так и закваской ацидофильной палочки, оказала концентрация биологического агента. Концентрация биологического агента определяет кинетическую силу системы. Для условий, установленных в эксперименте с химотрипсином и с закваской ацидофильной палочки, увеличение концентрации приводит к росту числа каталитических центров фермента или к увеличению числа клеток-секреторов протеаз, что, соответственно, повышает скорость расщепления пептидных связей и, как следствие, степень гидролиза.

При рассмотрении варианта гидролиза ферментом химотрипсином влияние концентрации согласуется с классической кинетикой ферментативных реакций Михаэлиса–Ментен: при прочих равных условиях увеличение количества фермента повышает скорость реакции пропорционально, пока субстрат не становится лимитирующим; при высоких концентрациях субстрата эффект нивелируется.

Для процесса гидролиза казеина закваской ацидофильной палочки эффект концентрации реализуется косвенно через биологическую динамику: большее инокулированное количество бактерий повышает скорость роста и метаболической активности культуры, ускоряет накопление эндогенных протеаз и модифицирующих метаболитов, что приводит к увеличению скорости и глубины гидролиза.

Отмечено, что гидролитическая способность микроорганизмов, используемых для ферментации казеина, повышается при оптимальных условиях [39]. При микробной ферментации молочнокислыми бактериями под воздействием кислой среды активизируются внеклеточные протеазы, активно расщепляющие белки, что способствует повышению степени гидролиза [40]. Однако механизмы гидролиза при микробной ферментации требуют более глубоких исследований, поскольку бактерии вырабатывают множество внеклеточных ферментов и других метаболитов [39].

Химотрипсин является специфическим ферментом желудочно-кишечного тракта, участвующим в процессе переваривания белковой пищи. Пептиды высвобождаются из казеина в процессе пищеварения и обработки пищи *in vitro* посредством ферментативного гидролиза. При этом трипсин и химотрипсин обладают наиболее высокой степенью гидролиза казеина [41].

Известны результаты ферментативного гидролиза казеина химотрипсином, полученные российскими учеными. При длительности процесса гидролиза 10 ч и температуре гидролиза 55 ± 3 °C препаратом с удельной активностью 40 усл. ед./мг и при добавлении его к субстрату в соотношении 1:50 степень гидролиза составила 32,84 %, что согласуется с результатами других ученых [42]. Другими исследователями установлено, что максимальная степень гидролиза достигается при ферментации казеина химотрипсином при температуре 37 ± 2 °C в течение 6 ч при соотношении фермента и субстрата 1:50 или 1:100; или в течение 12 ч при соотношении фермента и субстрата 1:25 или 1:50. Однако для используемого ферментного препарата отсутствуют данные об активности, поэтому сложно сопоставить полученные результаты [43]. Согласно приведенным данным, наиболее важными варьируемыми параметрами при установлении оптимальных параметров гидролиза являются продолжительность, температура гидролиза и концентрация фермента, что напрямую зависит от используемого препарата и его удельной активности.

С учетом прогнозируемой степени гидролиза от 16,94 до 21,99 % при проведении ферментации в оптимальных условиях получаемые гидролизаты казеина можно отнести к средне гидролизированным по классификации, описанной в работе [44], и рекомендовать их использовать в специализированных пищевых продуктах.

Таким образом, в результате проведения многофакторного эксперимента, обработки результатов, получения уравнения регрессии и поверхностей отклика степени гидролиза казеина в зависимости от параметров гидролиза выявлены оптимальные параметры для получения гидролизатов казеина. В дальнейшем планируется изготовить гидролизаты казеина по установленным параметрам и оценить дисперсный состав полученных гидролизатов, распределение пептидов по молекулярной массе и комплекс химических и технологических свойств для рекомендации к дальнейшему использованию в составе продуктов питания.

4. Выводы

Для получения гидролизатов казеина использовали фермент химотрипсин и бактериальную закваску ацидофильной палочки.

Для установления оптимальных параметров гидролиза проводили многофакторный эксперимент с построением матрицы планирования центрального композиционного ортогонального плана. Определяли изменение степени гидролиза при варьировании параметров гидролиза — продолжительности (от 3 до 9 ч для фермента и от 6 до 26 ч для закваски), температуры гидролиза (от 34 до 40 °C для фермента и от 32 до 42 °C для закваски) и количества закваски (от 0,5 до 1,5 %) или фермента (от 0,01 до 0,02 %).

Получено два уравнения регрессии процесса гидролиза казеина химотрипсином и бактериальной закваской. Установлены коэффициенты детерминации, подтверждающие высокую значимость моделей.

Построены поверхности отклика, показывающие зависимость степени гидролиза от параметров гидролиза, установлены оптимальные параметры гидролиза ферментом химотрипсином (например, при продолжительности гидролиза 21,99 ч, температуре 43,3 °C,

количестве фермента 0,02 % степень гидролиза составит 28,6 %) и закваской ацидофильной палочки (например, при продолжительности гидролиза 31,1 ч, температуре 35,8 °С, количестве закваски 1,5 % степень гидролиза составит 17,33 %).

Таким образом, результаты проведенного многофакторного эксперимента позволили установить оптимальные параметры гидролиза для получения гидролизатов казеина химотрипсином и закваской ацидофильной палочки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / REFERENCES

- Zaky, A. A., Simal-Gandara, J., Eun, J. B., Shim, J. H., Abd El-Aty, A. M. (2022). Bioactivities, applications, safety, and health benefits of bioactive peptides from food and by-Products: A review. *Frontiers in Nutrition*, 8, Article 815640. <https://doi.org/10.3389/fnut.2021.815640>
- Lorenzo, J. M., Munekata, P. E. S., Gómez, B., Barba, F. J., Mora, L., Pérez-Santaescolástica, C. et al. (2018). Bioactive peptides as natural antioxidants in food products — A review. *Trends in Food Science and Technology*, 79, 136–147. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.07.003>
- Nielsen, S.D., Beverly, R.L., Qu, Y., Dallas, D.C. (2017). Milk bioactive peptide database: A comprehensive database of milk protein-derived bioactive peptides and novel visualization. *Food Chemistry*, 232, 673–682. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.04.056>
- Najafian, L. (2023). A review of bioactive peptides as functional food ingredients: Mechanisms of action and their applications in active packaging and food quality improvement. *Food and Function*, 14, 5835–5857. <https://doi.org/10.1039/D3FO00362K>
- Lemes, A. C., de Oliveira Filho, J. G., Fernandes, S. S., Gautério, G. V., Egea, M. B. (2023). Bioactive Peptides from Protein-Rich Waste. Chapter in a book: Agricultural Waste: Environmental Impact, Useful Metabolites and Energy Production. Sustainable Development and Biodiversity. Springer, Singapore, 2023. https://doi.org/10.1007/978-981-19-8774-8_6
- Chourasia, R., Phukon, L. C., Singh, S. P., Raï, A. K., Sahoo, D. (2020). Role of enzymatic bioprocesses for the production of functional food and nutraceuticals. Chapter in a book: Biomass, Biofuels, Biochemicals, Elsevier, 2020. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819820-9.00015-6>
- Castañeda-Valbuena, D., Berenguer-Murcia, Á., Fernandez-Lafuente, R., Morelón-Sterling, R., Tacias-Pascacio, V. G. (2022). Biological activities of peptides obtained by pepsin hydrolysis of fishery products. *Process Biochemistry*, 120, 53–63. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2022.05.029>
- Vaishnav, A., Mehta, N. K., Hussain, S. A., Acharya, P. Ch., Biswal, S., Nath, H. et al. (2025). Bromelain excised hydrolysates with potent bioactivity from *Bellamyia bengalensis* soft tissues: Process optimization and characterization. *Journal of Agriculture and Food Research*, 19, Article 101595. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2024.101595>
- Coscueta, E. R., Batista, P., Gomes, J. E. G., da Silva, R., Pintado, M. M. (2022). Screening of novel bioactive peptides from goat casein: In silico to in vitro validation. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(5), Article 2439. <https://doi.org/10.3390/ijms23052439>
- Korhonen, H. (2009). Milk-derived bioactive peptides: From science to applications. *Journal of Functional Foods*, 1(2), 177–187. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2009.01.007>
- Ugwu, C. P., Abarshi, M. M., Mada, S. B., Sanusi, B., Nzelibe, H. Ch. (2019). Camel and horse milk casein hydrolysates exhibit angiotensin converting enzyme inhibitory and antioxidative effects in vitro and in silico. *International Journal of Peptide Research and Therapeutics* 25, 1595–1604. <https://doi.org/10.1007/s10998-018-09802-2>
- Bamdad, F., Shin, S. H., Suh, J. -W., Nimalaratne, C., Sunwoo, H. (2017). Anti-inflammatory and antioxidant properties of casein hydrolysate produced using high hydrostatic pressure combined with proteolytic enzymes. *Molecules*, 22(4), Article 609. <https://doi.org/10.3390/molecules22040609>
- Moita, T., Pedrosa, L., Santos, I., Lima, A. (2025). Casein and casein-derived peptides: Antibacterial activities and applications in health and food systems. *Nutrients*, 17, Article 1615. <https://doi.org/10.3390/nu17101615>
- Ren, R., Liu, L., Li, X., Zhang, X., Xu, M., Zhang, Z. et al. (2026). Identification and *in-silico* screening of ACE-inhibitory peptides from casein hydrolysate via fermentation with different probiotics. *International Dairy Journal*, 172, Article 106425. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2025.106425>
- Mada, S. B., Abaya, P. C., James, D. B., Abarshi, M. M., Tanko, M. S. (2020). Milk-derived bioactive peptides with antiosteoporotic effect: A mini review. *FUDMA Journal of Sciences*, 4(3), 351–357. <https://doi.org/10.33003/fjs-2020-0403-277>
- Wang, X., Yuan, X., Yan, R., Song, J., Ren, C., Li, H. et al. (2025). Purification, characterization, and functional validation of a novel casein complex enzyme hydrolysate-binding calcium. *Food Chemistry*, 476, Article 143438. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2025.143438>
- Duan, C., Zhang, L., Wu, C., Zhang, Y., Ma, F., Li, X. et al. (2025). An exploration on the structural characteristics and antioxidant activities of casein hydrolysates fermented by *Lactiplantibacillus plantarum* A56 and A157. *Food Bioscience*, 65, Article 106069. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2025.106069>
- Jauhainen, T., Rönneck, M., Vapaatalo, H., Wuolle, K., Kautiainen, H., Korpela, R. (2007). *Lactobacillus helveticus* fermented milk reduces arterial stiffness in hypertensive subjects. *International Dairy Journal*, 17(10), 1209–1211. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2007.03.002>
- Quiros, A., Ramos, M., Mugerza, B., Delgado, M. A., Miguel, M., Aleixandre, A. et al. (2007). Identification of novel antihypertensive peptides in milk fermented with *Enterococcus faecalis*. *International Dairy Journal*, 17(1), 33–41. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2005.12.011>
- Baars, T., van Esch, B., Diks, M., van Ooijen, L., Zhang, Z., Dekker, P. et al. (2025). Bacterial diversity, bioactive peptides, and enhanced immunomodulatory effects in raw milk kefir made with defined starter cultures versus backslipping. *International Dairy Journal*, 164, Article 106202. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2025.106202>
- Zhou, S., Xu, T., Zhang, X., Luo, J., An, P., Luo, Y. (2022). Effect of casein hydrolysate on cardiovascular risk factors: A systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials. *Nutrients*, 14(19), Article 4207. <https://doi.org/10.3390/nu14194207>
- Thomsen, J. P. S., Poulsen, N. A., Larsen, L. B. (2026). Effect of enzymatic dephosphorylation on *in vitro* digestion of purified bovine caseins. *International Dairy Journal*, 172, Article 106426. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2025.106426>
- Stokes, T., Hector, A. J., Morton, R. W., McGlory, C., Phillips, S. M. (2018). Recent perspectives regarding the role of dietary protein for the promotion of muscle hypertrophy with resistance exercise training. *Nutrients*, 10(2), Article 180. <https://doi.org/10.3390/nu10020180>
- Jiang, Y., Li, S., Yuan, R., Tuo, Y., Mu, G., Jiang, S. (2024). Preparation of casein hydrolysate by two-step enzymatic hydrolysis and its immunomodulatory activities *in vitro* and *in vivo*. *Food Bioscience*, 59, Article 104007. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2024.104007>
- Bueno-Gavilá E., Abellán A., Girón-Rodríguez F., Cayuela J. M., Salazar E., Gómez R. et al. (2019). Bioactivity of hydrolysates obtained from bovine casein using artichoke (*Cynara scolymus* L.) proteases. *Journal of Dairy Science*, 102(12), 10711–10723. <https://doi.org/10.3168/jds.2019-16596>
- Китаевская, С. В., Пономарев, В. Я., Решетник, О. А. (2022). Оценка протеолитической активности новых штаммов лактобацилл с криореzистентными свойствами. *Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология*, 12(1), 76–86. [Kitaevskaya, S. V., Ponomarev, V. Y., Reshetnik, O. A. (2022). Evaluation of the proteolytic activity of new cryoresistant lactobacillus strains. *Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*, 12(1), 76–86. (In Russian)] <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2022-12-1-76-86>
- Zhao, L., Gao, P., Zhang, Y., Wang, X., Lu, S., Yue, C. et al. (2024). Measurement of degree of hydrolysis and molecular weight distribution of protein hydrolysates by liquid chromatography-mass spectrometry. *Talanta*, 268(Part 1), Article 125347. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2023.125347>
- Cruz-Casas, D. E., Chávez-García, S. N., García-Flores, L. A., Martínez-Medina, G. A., Ramos-González, R., Prado-Barragán, L. A. et al. (2025). Bioactive peptides from fermented milk products. Chapter in a book: Foundations and Frontiers in Enzymology, Enzymes Beyond Traditional Applications in Dairy Science and Technology, Academic Press, 2023. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-96010-6.00010-2>
- Doneva, M., Dyankova, S., Terziyska, M., Metodieva, P., Nacheva, I. (2024). Antioxidant protein hydrolysates from hemp seed oil cake — optimization of the process using response surface methodology. *Applied Sciences*, 14(19), Article 8602. <https://doi.org/10.3390/app14198602>
- Santos, B. A. S., Azambuja, S. P. H., Ávila, P. F., Pacheco, M. T. B., Goldbeck, R. (2020). n-Butanol production by *Saccharomyces cerevisiae* from protein-rich agro-industrial by-products. *Brazilian Journal of Microbiology*, 51, 1655–1664. <https://doi.org/10.1007/s42770-020-00370-6>
- Mirzaei Teshnizi, Z., Robatjazi, S. M., Mosaabadi, J. M. (2020). Optimization of the enzymatic hydrolysis of poultry slaughterhouse wastes using alcalase enzyme for the preparation of protein hydrolysates. *Applied Food Biotechnology*, 7(3), 153–160. <https://doi.org/10.22037/afb.v7i3.28417>
- Fang, K.-X., Sun, X., Chen, L.-K., Wang, K., Yang, C.-J., Mei, S.-S. et al. (2025). A novel integrated strategy for discovering absorbable anticoagulant bioactive peptides: A case study on leech protein hydrolysates. *Molecules*, 30(15), Article 3184. <https://doi.org/10.3390/molecules30153184>
- Остроумов, Л. А., Бабищ, О. О., Милентьева, И. С. (2013). Оценка состава и физико-химических свойств ферментативных гидролизатов казеина. *Вестник ВСГУТУ*, 1(40), 82–85. [Ostroumov, L. A., Babich, O. O., Milentyeva, I. S. (2013). Evaluation of composition and physicochemical properties of the enzyme casein hydrolysates. *ESSUTM Bulletin*, 1(40), 82–85. (In Russian)]
- Knuf, F., Caspers-Weiffenbach, R., Schieber, A., Fontana, A. (2025). Peptidomics profiling and biological activities of grape pomace protein hydrolysates. *Food Chemistry*, 463(Part 1), Article 141032. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.141032>
- Damen, D., Thibodeau, J., Gaaloul, S., Fliss, I., Labrie, S., Hamoudi, S. et al. (2024). Influence of enzymatic hydrolysis conditions on antimicrobial activities and peptide profiles of milk protein-derived hydrolysates from white wastewater. *Cleaner Waste Systems*, 9, Article 100172. <https://doi.org/10.1016/j.clwas.2024.100172>
- Habib, M., Singh, S., Hanan, E., Jan, K., Bashir, K. (2025). Optimization of enzymatic hydrolysis for obtaining antioxidant hydrolysates from pumpkin seed protein: Improvement of the physicochemical, structural and functional properties. *Applied Food Research*, 5(2), Article 101272. <https://doi.org/10.1016/j.afres.2025.101272>
- Лепилкина, О. В., Григорьева, А. И. (2023). Ферментативный протеолиз при преобразовании молока в сыр. *Пищевые системы*, 6(1), 36–45. [Lepilkina, O. V., Grigorieva, A. I. (2023). Enzymatic proteolysis during the conversion of milk into cheese. *Food Systems*, 6(1), 36–45. (In Russian)] <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2023-6-1-36-45>
- Lotfi, M., Keshvari, T., Taghizadeh, M. S., Afsharifar, A., Moghadam, A., Aram, F. et al. (2025). Optimizing *Camelina sativa* oil extraction and its cytotoxicity using RSM by emphasis on antioxidant properties, physical characteristics, and molecular docking insights. *Industrial Crops and Products*, 224, Article 120334. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.120334>
- Ren, J., Yu, D., Li, N., Liu, S., Xu, H., Li, J. et al. (2023). Biological characterization and whole-genome analysis of *Bacillus subtilis* MG-1 isolated from mink fecal samples. *Microorganisms*, 11(12), Article 2821. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11122821>

40. Reale, A., Di Stasio, L., Di Renzo, T., De Caro, S., Ferranti, P., Picariello, G. et al. (2021). Bacteria do it better! Proteomics suggests the molecular basis for improved digestibility of sourdough products. *Food Chemistry*, 359, Article 129955. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129955>
41. Zhao, Q., Shi, Y., Wang, X., Huang, A. (2020). Characterization of a novel antimicrobial peptide from buffalo casein hydrolysate based on live bacteria adsorption. *Journal of Dairy Science*, 103(12), 11116–11128. <https://doi.org/10.3168/jds.2020-18577>
42. Курбанова, М. Г., Бондарчук, О. Н., Масленикова, С. М. (2013). Практические аспекты гидролиза казеина молока эндопептидазами. *Техника и технология пищевых производств*, 2(29), 34–39. [Kurbanova, M. G., Bondarchuk, O. N., Maslennikova, S. M. (2013). Practical aspects of hydrolysis of milk casein by endopeptidases. *Food Processing: Techniques and Technology*, 2(29), 34–39. (In Russian)]
43. Милентьева, И. С., Давыденко, Н. И., Расщепкин, А. Н. (2020). Подбор рабочих параметров для проведения направленного протеолиза казеина с целью получения биопептидов. *Техника и технология пищевых производств*, 50(4), 726–735. [Milentyeva, I. S., Davydenko, N. I., Rasshchepkin, A. N. (2020). Casein Proteolysis in Bioactive Peptide Production: Optimal Operating Parameters. *Food Processing: Techniques and Technology*, 50(4), 726–735. (In Russian)] <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2020-4-726-735>
44. Агаркова, Е. Ю., Кручинин, А. Г. (2018). Ферментативная конверсия как способ получения биологически активных пептидов. *Вестник МГТУ. Труды Мурманского государственного технического университета*, 21(3), 412–419. [Agarkova, E. Yu., Kruchinin, A. G. (2018). Enzymatic conversion as a method of producing biologically active peptides. *Vestnik of MSTU*, 21(3), 412–419. (In Russian)]

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) 454080, Челябинск, пр. Ленина, 76 E-mail: zininaov@susu.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4817-1645 * автор для контактов	Oksana V. Zinina , Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Food and Biotechnology, South Ural State University (National Research University). 76, Lenin av., 454080, Chelyabinsk, Russia E-mail: zininaov@susu.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4817-1645 * corresponding author
Чанов Илья Михайлович — аспирант, кафедра «Пищевые и биотехнологии», Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет) 454080, Челябинск, пр. Ленина, 76 E-mail: chanovi2000@mail.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7484-3252	Ilya M. Chanov , Postgraduate Student, Department of Food and Biotechnology, South Ural State University (National Research University) 454080, Chelyabinsk, Lenin Ave., 76 E-mail: chanovi2000@mail.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7484-3252
Ребезов Максим Борисович — доктор сельскохозяйственных наук, профессор, главный научный сотрудник, Федеральный научный центр пищевых систем им. В. М. Горбатова РАН 109316, Москва, ул. Талалихина, 26 E-mail: rebezov@ya.ru ORCID: http://orcid.org/0000-0003-0857-5143	Maksim B. Rebezov , Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Chief Researcher, V. M. Gorbатов Federal Research Center for Food Systems 26, Talalikhin str., Moscow, 109316, Russia E-mail: rebezov@ya.ru ORCID: http://orcid.org/0000-0003-0857-5143
Ли Ян — профессор, доктор технических наук, Колледж пищевых наук, Школа питания, Северо-Восточный сельскохозяйственный университет 600 Чанцзян Роуд, район Сянфан, город Харбин, провинция Хэйлунцзян, Китай 150030 E-mail: liyanguangyu@163.com ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8758-5512	Yang Li , Professor, Doctor of Engineering, College of Food Science, School of Food, Northeast Agricultural University, China 600 Changjiang Road, Xiangfang District, Harbin City, Heilongjiang Province, China 150030 E-mail: liyanguangyu@163.com ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8758-5512
Ли Чунь — доктор продовольственных наук, профессор, колледж продовольственных наук, Северо-Восточный сельскохозяйственный университет 600 Чанцзян Роуд, район Сянфан, город Харбин, провинция Хэйлунцзян, Китай 150030 E-mail: lichun@neau.edu.cn ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1603-7222	Chun Li , Doctor of food Science, Professor, College of Food Science, Northeast Agricultural University 600 Changjiang Road, Xiangfang District, Harbin City, Heilongjiang Province, China 150030 E-mail: lichun@neau.edu.cn ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1603-7222
Чжао Инин — кандидат в докторантуру, колледж продовольственных наук, Северо-Восточный сельскохозяйственный университет 150036, Харбин, Дорога Чанцзян, 600 E-mail: zyy210125@126.com ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7061-779X	Yingying Zhao , Doctoral Candidate, College of Food Science, Northeast Agricultural University 150036, Harbin, Changjiang Road, 600 E-mail: zyy210125@126.com ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7061-779X
Критерии авторства	Contribution
Концептуализация — Зинина О. В., Ли Я. и Ли Ч. Методология — Зинина О. В. и Ребезов М. Б. Исследование — Чанов И. М. и Чжао И. Обработка и анализ данных — Зинина О. В. и Ребезов М. Б. Написание статьи и редактирование — Зинина О. В., Ребезов М. Б., Ли Ч. и Ли Я.	Conceptualization — Oksana V. Zinina, Yang Li and Chun Li. Methodology — Oksana V. Zinina and Maksim B. Rebezov. Investigation — Ilya M. Chanov and Yingying Zhao. Data curation and analysis — Oksana V. Zinina and Chun Li. Writing-article and editing — Oksana V. Zinina., Maksim B. Rebezov, Chun Li and Yang Li.
Конфликт интересов	Conflict of interest
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.	The authors declare no conflict of interest.

DOI: <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-4-624-631>



Поступила 01.08.2025

Поступила после рецензирования 23.12.2025

Принята в печать 29.12.2025

© Виров А. И., Аксенов А. С., Сорокина Т. Ю., 2025

<https://www.fsjour.com/jour>

Научная статья

Открытый доступ

ИЗМЕНЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ЧЕТЫРЕХ ТОКСИЧНЫХ И ДВУХ ЭССЕНЦИАЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ФИЛЕ СЕМГИ ПРИ КУЛИНАРНОЙ ОБРАБОТКЕ РАЗЛИЧНЫМИ СПОСОБАМИ

Виров А. И.,* Аксенов А. С., Сорокина Т. Ю.

Северный (Арктический) федеральный университет имени М. В. Ломоносова, Архангельск, Россия

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: АННОТАЦИЯ

семга, эссенциальные элементы, тяжелые металлы, изменение химического состава, кулинария

Десять образцов семги (атлантического лосося, *Salmo salar* L.), выловленные в реке Мезень Мезенского округа Архангельской области (АО), были приготовлены традиционными для данной местности способами: варка, обжаривание, запекание и посол. Способы приготовления рыбы, посуда и сопутствующие приготовлению материалы были выбраны на основании данных анкетирования местного населения. В работе экспериментально оценено влияние четырех способов кулинарной обработки на концентрацию шести элементов в рыбном филе: ртути (Hg), мышьяка (As), свинца (Pb), кадмия (Cd), цинка (Zn) и меди (Cu). Анализ результатов эксперимента демонстрирует изменение всех шести элементов в филе семги при кулинарной обработке независимо от выбранного способа, хотя каждый способ оказывает влияние на эти показатели в разной степени. В результате исследования было выявлено, что процесс варки в наибольшей степени приводит к снижению уровня ртути и мышьяка в семге. Данный способ приготовления рыбы предпочтителен и для максимального сохранения эссенциальных элементов — цинка и меди. При этом мышьяк и свинец при варке переходят в бульон. Показано, что для снижения концентрации кадмия семгу лучше всего засаливать. Кроме того, при посоле было зафиксировано существенное снижение уровня ртути в рыбном филе. Однако этот способ приготовления также приводит к снижению концентрации эссенциальных цинка и меди. При обжаривании и запекании наблюдалось схожее изменение уровней кадмия и меди. Подтверждено, что приготовление рыбы при высокой температуре (обжаривание, запекание) способствует снижению уровней эссенциальных цинка и меди.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: статья подготовлена в рамках выполнения государственного задания № FSRU-2023-0004 Северного (Арктического) федерального университета имени М. В. Ломоносова.

Received 01.08.2025

Accepted in revised 23.12.2025

Accepted for publication 29.12.2025

© Virov A. I., Aksenov A. S. Sorokina T. Yu., 2025

Available online at <https://www.fsjour.com/jour>

Original scientific article

Open access

CHANGES IN THE CONTENT OF FOUR TOXIC AND TWO ESSENTIAL ELEMENTS IN THE ATLANTIC SALMON FILLET DURING CULINARY PROCESSING BY VARIOUS METHODS

Arkadiy I. Virov*, Andrei S. Aksenov, Tatiana Yu. Sorokina

Northern (Arctic) Federal University named after M. V. Lomonosov, Arkhangelsk, Russia

KEYWORDS:

Atlantic salmon, essential elements, heavy metals, change in chemical composition, cooking

ABSTRACT

Ten samples of Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) caught in the Mezen River in the Mezensky District of the Arkhangelsk Region were prepared by the methods traditional for this place: cooking, frying, baking and salting. Methods for fish preparation, utensils and auxiliary materials were chosen based on the data of survey of the local population. The study assessed experimentally an effect of four methods of culinary processing on the concentration of six elements in the fish fillet: mercury (Hg), arsenic (As), lead (Pb), cadmium (Cd), zinc (Zn) and copper (Cu). Analysis of the results of the experiment demonstrates changes in all six elements in the Atlantic salmon fillet upon culinary processing irrespective of the chosen method, although each method affected these indicators in different degrees. As a result of the study, it has been established that the cooking process led to a decrease in the level of mercury and arsenic in Atlantic salmon in the highest degree. This method of fish preparation is also preferable for the maximum preservation of essential elements — zinc and copper. With that, arsenic and lead are drawn into the broth during cooking. It has been shown that it is best to salt Atlantic salmon to reduce a concentration of cadmium. Salting also demonstrated a significant reduction in the levels of mercury in the fish fillet. However, salting also reduces the concentration of essential zinc and copper. Frying and baking demonstrated the similar effect on changes in the levels of cadmium and copper. It has been confirmed that fish preparation at a high temperature (frying, baking) facilitates a decrease in the levels of essential zinc and copper.

FUNDING: the article was prepared as part of the implementation of the state task No. FSRU-2023-0004.

1. Введение

Рыба — крайне популярный продукт питания среди жителей северных регионов России. По результатам опроса населения Мезенского округа Архангельской области, ценный представитель лососевых, семга (*Salmo salar* L.), является предпочтительным в питании видом рыбы. Это подтверждается и результатами ранее опубликованных ихтиологических [1] и антропологических [2,3] исследова-

ний. Благодаря высокой калорийности (около 155 ккал на 100 г филе) и большому количеству белка и липидов, семга широко распространена и популярна на рынке. Кроме того, данный вид рыбы отличается сбалансированным химическим составом. Так, в литературе отмечается высокий уровень меди и цинка в филе семги [4,5]. Токсичные элементы, такие как мышьяк, свинец, ртуть и кадмий, иногда идентифицируются в филе семги, однако их уровень во многом зависит

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Виров, А. И., Аксенов, А. С., Сорокина, Т. Ю. (2025). Изменение содержания четырех токсичных и двух эссенциальных элементов в филе семги при кулинарной обработке различными способами. *Пищевые системы*, 8(4), 624–631. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-4-624-631>

FOR CITATION: Virov, A. I., Aksenov, A. S. Sorokina, T. Yu. (2025). Changes in the content of four toxic and two essential elements in the atlantic salmon fillet during culinary processing by various methods. *Food Systems*, 8(4), 624–631. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-4-624-631>

от загрязнения водных объектов [4,6–8]. В ходе различных кулинарных обработок, как правило, происходит изменение концентрации как эссенциальных, так и токсичных элементов [9,10,11]. В связи с этим требуется изучение не только элементного состава рыбы, но и влияния способов приготовления на содержание отдельных соединений в продукции из распространенных видов рыб.

Выбор объекта исследования — семги — обусловлен ограниченностью информации о влиянии различных способов приготовления на ее элементный состав, а также историко-культурными особенностями потребления этой рыбы населением Мезенского округа. Семга являлась одной из основных промысловых рыб поморов. Семужий промысел впервые появился в Белом море примерно в III тысячелетии до нашей эры. Изначально вылов семги был не так велик и велся исключительно для личных нужд. В новгородский период Руси появились первые налоги на вылов, которые крестьяне выплачивали семгой. В XVI веке, благодаря хозяйственной деятельности северных монастырей, начался рост народонаселения севера, и семга стала промысловой рыбой. В конце XVI — начале XVII столетия Россия пережила войны со Швецией и период Смутного времени, что привело к разорению множества промысловых деревень, уничтожению промысловых судов. К концу XVII столетия регион восстановился и вылов рыбы вновь стал расти, способствуя улучшению экономического положения поморов. К XIX веку государство обратило внимание на сокращение популяции семги в северных реках и предприняло попытки контроля вылова. Крестьяне игнорировали большинство ограничений или исполняли их формально, что практически полностью перевело данный вид промысла в сферу нелегальной деятельности и привело к значительному сокращению популяции семги, последствия которого ощущаются в регионе по настоящее время [12,13]. На современном этапе допустимый объем вылова устанавливается и изменяется ежегодно на основе биологических, экономических и правовых механизмов регулирования [14].

Целью данного исследования является изучение влияния варки, запекания, посола и обжаривания на уровень цинка, меди, кадмия, свинца, ртути и мышьяка в семге с последующим выявлением наиболее подходящих способов обработки для уменьшения концентрации токсичных и сохранения эссенциальных элементов.

2. Объекты и методы

2.1. Анкетирование

Рыба, использованная для эксперимента, была выловлена в реке Мезенского округа Архангельской области в рамках реализации проекта РНФ 22-15-20076 «Мониторинг, оценка и прогнозирование угроз для здоровья человека, связанных с неконтролируемыми переносами загрязняющих веществ и патогенов мигрирующими видами рыбы и птицы, добываемыми жителями Архангельской области традиционными для данной местности способами». Одной из задач настоящего исследования было проведение лабораторного эксперимента в условиях, максимально приближенных к реальным. Для этого среди населения Мезенского округа Архангельской области (в период проведения настоящего исследования Мезенский муниципальный район был преобразован в Мезенский муниципальный округ) было проведено онлайн-анкетирование с целью определения способов приготовления семги, традиционных для данной местности. Анкета была составлена с помощью бесплатного сервиса «Яндекс Формы» (Рисунок 1).

Анкетирование проводилось в течение одного месяца в группах популярной российской социальной сети «ВКонтакте». Для этих целей были выбраны местные сообщества, посвященные жизни в Мезенском округе: «Реальность нашего поселка Каменка Мезенский округ», «Официальная страница сетевого издания «Север», «Подслушано Мезень», «Долгощелье».

Всего анкетирование прошли 78 человек, однако после применения критериев включения было отобрано 54 анкеты. Критериями включения были определены: а) возраст анкетированного лица

<p>1) Вы проживаете в Мезенском округе Архангельской области?</p> <ul style="list-style-type: none"> <input type="radio"/> да <input checked="" type="radio"/> нет <p>2) Как давно вы проживаете в Мезенском округе Архангельской области?</p> <p>с _____. _____. _____. г.</p> <p>до _____. _____. _____. г.</p> <p>3) В каком населенном пункте вы проживаете?</p> <p>_____</p> <p>4) Как часто вы употребляете семгу в пищу?</p> <ul style="list-style-type: none"> <input type="radio"/> не употребляю <input type="radio"/> один раз в полгода или реже <input type="radio"/> один раз в месяц <input type="radio"/> один раз в неделю и чаще <p>5) Как вы предпочитаете готовить семгу?</p> <ul style="list-style-type: none"> <input type="radio"/> засаливать <input type="radio"/> варить <input checked="" type="radio"/> жарить <input type="radio"/> запекать <input type="radio"/> другое <p>6) Какую соль вы используете при посоле семги?</p> <ul style="list-style-type: none"> <input type="radio"/> йодированную <input type="radio"/> не йодированную <input checked="" type="radio"/> не обращаю внимание <p>7) Какую соль вы используете при других способах приготовления семги?</p> <ul style="list-style-type: none"> <input type="radio"/> йодированную <input type="radio"/> не йодированную <input checked="" type="radio"/> не обращаю внимание <p>8) Какое масло вы используете при приготовлении семги?</p> <ul style="list-style-type: none"> <input type="radio"/> подсолнечное нерафинированное <input type="radio"/> подсолнечное рафинированное <input checked="" type="radio"/> оливковое первого отжима (extra virgin) <input type="radio"/> оливковое рафинированное <input type="radio"/> сливочное <p>9) Укажите марку масла, которые вы используете чаще всего.</p> <p>_____</p>	<p>10) Какую воду вы используете при приготовлении пищи?</p> <ul style="list-style-type: none"> <input type="radio"/> бутилированную <input type="radio"/> кипяченую <input checked="" type="radio"/> фильтрованную водопроводную <p>11) Посуду из какого материала вы используете при приготовлении ухи?</p> <ul style="list-style-type: none"> <input type="radio"/> алюминиевую <input type="radio"/> эмалированную <input checked="" type="radio"/> другое, а именно _____ <p>12) Посуду из какого материала вы используете при обжаривании семги?</p> <ul style="list-style-type: none"> <input type="radio"/> с тефлоновым покрытием <input type="radio"/> чугунную <input checked="" type="radio"/> другое, а именно _____ <p>13) Посуду из какого материала вы используете при запекании семги?</p> <ul style="list-style-type: none"> <input type="radio"/> керамическую <input type="radio"/> глиняную ("латка") <input checked="" type="radio"/> с тефлоновым покрытием <input type="radio"/> другое, а именно _____ <p>14) К какой возрастной категории вы относитесь?</p> <ul style="list-style-type: none"> <input type="radio"/> 18-25 лет <input type="radio"/> 26-35 лет <input type="radio"/> 36-50 лет <input checked="" type="radio"/> 51-70 лет <input type="radio"/> старше 70 лет <p>15) Используете ли вы сахар при посоле семги?</p> <ul style="list-style-type: none"> <input type="radio"/> да <input type="radio"/> нет <input checked="" type="radio"/> не солю рыбу
---	--

Рисунок 1. Вид анкеты жителей Мезенского округа Архангельской области
Figure 1. Questionnaire for the residents of the Mezensky District of the Arkhangelsk Region

старше 18-ти лет; б) постоянное проживание анкетированного лица на территории Мезенского округа. Анализ результатов анкетирования позволил определить приоритетные способы приготовления семги, а также сопутствующие продукты и, наиболее подходящие материалы для используемой посуды.

2.2. Отбор образцов

Для целей настоящего исследования использовались образцы 10 особей семги, выловленных в реке Мезень местными жителями летом 2022 года и осенью 2023 года. Средний вес отобранных особей рыбы составил 4019 грамм, средний возраст — 2 года. До начала эксперимента рыба содержалась в морозильном ларе Gorenje FH 40 BW (Gorenje, Сербия) при температуре минус 20 °С. Для целей эксперимента рыба размораживалась при комнатной температуре в течение 12 часов, после чего от каждой особи отделялось по 6 кусков филе весом по 50 грамм. Пять кусков (образцов) филе подвергались кулинарной обработке. Один кусок (образец) — исходный — был сразу гомогенизирован с помощью погружного блендера JMK-3016 (Jamaky, Китай), лиофильно высушен с помощью FreeZone (Labconco, США) и до проведения количественного химического анализа помещен в морозильный шкаф сверхглубокой заморозки Binder UF V 500 (Binder, Германия) для хранения при температуре минус 80 °С.

2.3. Кулинарная обработка

По результатам анкетирования приоритетными способами кулинарной обработки семги были выбраны четыре: варка, посол, запекание и обжаривание (Рисунок 2). Филе каждой особи семги подвергалось каждому способу кулинарной обработки. Используемая посуда перед приготовлением каждого образца филе рыбы промывалась дистиллированной водой. Варка первого образца филе рыбы производилась в течение 10 минут при температуре 100 °С на лабораторной плите «ПЭ» (ОАО «Электроприбор», Россия) с использованием фильтрованной воды в кастрюле из нержавеющей стали объемом 600 мл. Для фильтрования воды использовался фильтр «Аквафор Стандарт» («Аквафор», Россия). В соответствии с рецептами, описанными в книге «Северная кухня» [15], использовали 1 грамм не йодированной соли «Илецкая» (ООО «Руссоль», Россия). Пробоподготовка для последующего количественного химического анализа (КХА) осуществлялась только в отношении образца филе. Второй образец филе рыбы был приготовлен таким же способом, однако пробоподготовка для КХА осуществлялась в отношении филе вместе с получившимся бульоном. Посол третьего образца филе рыбы производился с использованием 6 грамм не йодированной соли. Образец натерли солью со всех сторон, после чего заворачивали в пергаментную бумагу и помещали в пищевой эмалированный контейнер. На образец помещались гнет и крышка, что соответствовало традиционному способу посола. Контейнер с образцом выдерживали в холодильнике ХФ-140 (POZIS, Россия) в течение 12 часов при температуре 4,7 °С, после чего образец подвергался пробоподготовке для КХА без жидкости, которая образовалась в процессе посола. Для запекания четвертого образца филе рыбы использовалась электрическая печь Electrolux EOB53202 X (Electrolux, Германия) и «латка» (традиционно и широко используемая на севере Архангельской области глиняная миска, изготавливаемая мезенскими мастерами из местных природных материалов [16]). Образец был предварительно посолен 1 граммом не йодированной соли и смазан рафинированным подсолнечным маслом «Золотая семечка» (АО «Юг Руси», Россия). Затем помещен в печь, разогретую

до температуры 180 °С, на 20 минут. Пятый образец филе рыбы обжаривался по 3 минуты с обеих сторон на чугунной сковороде, предварительно смазанной растительным маслом и нагретой до 180 °С. В процессе обжаривания образец был обработан 1 граммом соли. Все приготовленные ($n=50$) и контрольные ($n=10$) образцы были гомогенизированы с помощью погружного блендера JMK-3016 (Jamaky, Китай), лиофильно высушены с помощью FreeZone (Labconco, США) и до проведения количественного химического анализа помещены в морозильник Binder UF V 500 (Binder, Германия) для хранения при температуре минус 80 °С. Гравиметрическим методом определяли убыль массы рыбы после кулинарной обработки с использованием аналитических весов PIONEER (OHAUS, Германия).

2.4. Химический анализ

Во всех образцах определяли концентрацию шести элементов: ртути (Hg), мышьяк (As), свинец (Pb), кадмий (Cd), цинк (Zn) и медь (Cu). Помимо этого, исходные образцы были исследованы на соответствие требованиям ТР ТС 021/2011¹. Содержание токсичных элементов (свинец, кадмий, мышьяк и ртуть) в исходном сырье не превышало установленные нормативы.

Количественный химический анализ проводился с помощью иверсионно-вольтамперометрического метода с применением аналитического вольтамперометрического комплекса СТА в соответствии с МУ 08-47/136², МУ 08-47/167³ и МУ 08-47/175⁴. Для анализа проб рыбы по МУ 08-47/136² одновременно использовали две параллельные и одну холостую (контрольную) пробу. Проба весом 0,5–1 грамма подвергалась минерализации с использованием концентрированной азотной кислоты, пероксида водорода с последующим нагреванием до температуры в 450 °С. После из полученного минерализата для ИВ-измерения отбирали аликвоту объемом 10 см³. Пробоподготовка к измерению массовой концентрации ртути по МУ 08-47/167³: в гомогенизированную пробу добавляли азотную кислоту, после чего проба нагревалась до полного растворения. После охлаждения тары до комнатной температуры из раствора брали аликвоту и нагревали ее до 120 °С, добавляя раствор перекиси водорода. После остывания в пробу вносили 0,04 см³ раствора золота. Пробоподготовка к измерению массовой концентрации мышьяка по МУ 08-47/175⁴: в пробу добавляли раствор нитрата магния и азотную кислоту, после чего раствор нагревали до 100 °С. После растворения пробу выпаривали при температуре 120–130 °С. Проба повторно (5–6 раз) обрабатывалась азотной кислотой и пероксидом водорода. Сухой остаток пробы помещался в разогретую муфельную печь. Полученный сухой остаток после остывания разбавляли бидистиллированной водой и серной кислотой, также добавляли сернокислый гидразин. Раствор вновь нагревали до 300 °С до полного высыхания. В конце пробоподготовки добавляли трилон Б.

В стаканчик с раствором фоновый электролит был внесена аликвота пробы объемом 1,0 см³. В раствор помещались индикаторный электрод (катод) и электрод сравнения (анод). Чувствительность прибора (вольтамперометрический анализатор ТА-Lab, Россия) была установлена на значение $4 \cdot 10^{-9}$ А/мм, а время электролиза составляло 150 секунд. Затем включалось пропускание газа через испытуемый раствор для его перемешивания в течение 180 секунд. После

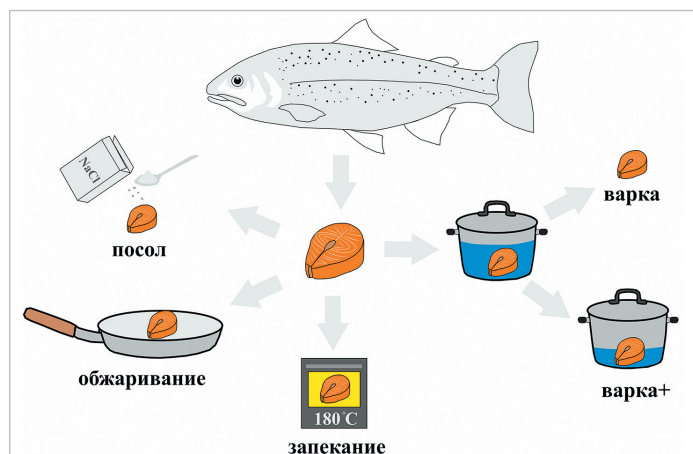


Рисунок 2. Используемые способы кулинарной обработки
Figure 2. Used methods of culinary processing

¹ ТР ТС 021/2011 «Технический регламент Таможенного союза. О безопасности пищевой продукции (с изменениями на 22 апреля 2024 года). Утвержден Решением Комиссии Таможенного союза от 9 декабря 2011 года № 880.

² МУ 08-47/136 «Продукты пищевые и продовольственное сырье. Иверсионно-вольтамперометрические методы определения содержания токсичных элементов (кадмия, свинца, меди и цинка)» (Документ разработан в Томском политехническом университете и ООО ВНП Ф «ЮМХ». Методика аттестована в соответствии с ГОСТ Р 8.563 (ГОСТ 8.010). Документ зарегистрирован в Федеральном реестре методик выполнения измерений, применяемых в сферах распространения государственного метрологического контроля и надзора РФ (регистрационный код ФР.1.31.2005.01637).

³ МУ 08-47/167 «Рыба, морепродукты, нерыбные объекты промысла и продукты, вырабатываемые из них. Вольтамперометрический метод измерения массовой концентрации ртути» (Документ разработан в Томском политехническом университете, ООО ВНП Ф «ЮМХ» и ООО «НПП Томаналит»). Методика аттестована в соответствии с ГОСТ Р 8.563 (ГОСТ 8.010). Документ зарегистрирован в Федеральном реестре методик выполнения измерений, применяемых в сферах распространения государственного метрологического контроля и надзора (регистрационный код ФР.1.31.2005.01452)).

⁴ МУ 08-47/175 «Продукты пищевые и продовольственное сырье. Иверсионно-вольтамперометрический метод определения массовой концентрации мышьяка» (Документ разработан в Томском политехническом университете и ООО ВНП Ф «ЮМХ». Методика аттестована в соответствии с ГОСТ Р 8.563 (ГОСТ 8.010). Методика внесена в Государственный реестр методик выполнения измерений, применяемых в сферах распространения государственного метрологического контроля и надзора (регистрационный код ФР.1.31.2005.01552)).

этого проводился процесс электролиза в растворе фонового электролита, также в течение 180 секунд при заданной чувствительности полярографа. По окончании электролиза газ был отключен и через 5 секунд была начата регистрация вольтамперограммы в диапазоне потенциалов от минус 1,20 В до 0,15 В. После этого потенциал оставлялся при 0,15 В и проводилось дорастворение примесей с поверхности электрода при перемешивании раствора газом в течение 20 секунд. Процесс электролиза повторялся 3 раза. Сначала измерили высоты анодных пиков определяемых элементов с помощью измерительной линейки. Затем в стаканчик с анализируемым раствором с помощью пипетки или дозатора внесли добавки аттестованных смесей элементов так, чтобы высоты соответствующих анодных пиков на вольтамперной кривой увеличились примерно в два раза по сравнению с первоначальными значениями. При этом добавки вводились в малом объеме (не более 0,2 см³), чтобы избежать изменения концентрации раствора фонового электролита и разбавления анализируемой пробы. Далее проводился электролиз и регистрация вольтамперограмм анализируемой пробы с введенными добавками АС кадмия, свинца, меди и цинка три раза, с наблюдением тех же условий, что и при первоначальном анализе. После этого были измерены высоты анодных пиков элементов в пробе с добавками АС. Затем содержимое стаканчика вылили, стаканчик промыли бидистиллированной водой и повторили все операции для каждой из параллельно анализируемых проб и для холостой пробы, соблюдая одинаковые условия проведения эксперимента.

При анализе пробы на уровень содержания ртути с использованием анализатора СТА одновременно проводился анализ двух параллельных и одной холостой проб в трех разных стаканчиках. Подготовленные для измерения пробы и холостая проба были помещены в электрохимическую ячейку, опускались электроды. В результате выполнения серии измерений было выведено 4 вольтамперограммы. С помощью пипетки вносилась добавка АС ртути объемом 0,01 см³ и концентрацией 1 мг/дм³. После завершения всех измерений, исключения выпавших кривых и усреднения результатов анализ пробы на содержание ртути был завершен. Анализ пробы на содержание мышьяка проводится аналогичным способом, за исключением того, что добавка имеет объем 0,02 см³ и концентрацию 10 мг/дм³.

Статистическая обработка проводилась с применением программного обеспечения SPSS (IBM Corp., Армонк, Нью-Йорк, США). Были рассчитаны средние геометрические значения и стандартные отклонения концентраций токсичных и эссенциальных элементов в образцах филе семги до и после приготовления. Для оценки соответствия данных нормальному распределению был применен тест Шапиро-Уилка [17]. Непараметрические тесты Крускала-Уоллиса были проведены для проверки значимости возможных различий содержания элементов в семге в зависимости от способа приготовления. При значениях $p < 0,05$ различия были значимыми (уровень достоверности 95%).

3. Результаты и обсуждение

3.1. Результаты анкетирования

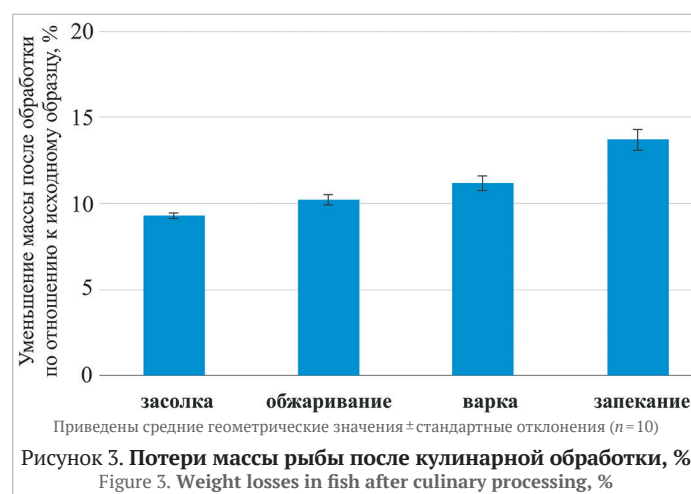
Средний возраст участников анкетирования составил 43 года. Самыми активными участниками были люди в возрасте от 51 до 70 лет (40,74%, $n = 22$) и в возрасте от 36 до 50 лет (35,19%, $n = 19$). Наименьшее количество анкет было заполнено участниками возрастных групп от 18 до 25 лет ($n = 1$), от 26 до 35 лет ($n = 7$) и старше 70 лет ($n = 5$), что составило 1,85%, 12,96% и 9,26% соответственно. Самым популярным способом приготовления семги в пищу стал посол, что было отмечено 79,63% опрошенных ($n = 43$). Респонденты также отметили варку — 35,19% ($n = 19$), обжаривание и запекание — 51,85% ($n = 28$). Обжаривание и запекание в анкете были приведены вместе в одном вопросе, однако в связи с тем, что при этих двух способах приготовления рыбы используется разная посуда, которая потенциально могла оказать влияние на результаты количественного химического анализа приготовленных образцов, во время проведения эксперимента было принято решение о выделении каждого из этих способов в отдельный этап.

Следующие вопросы анкеты касались используемых продуктов и посуды при приготовлении рыбы. Так, при посоле 81,48% опрошенных используют не йодированную соль ($n = 44$). При других способах приготовления рыбы также большинство предпочитает использовать не йодированную соль — 64,81% ($n = 35$). Сахар при посоле используют только 16,67% опрошенных, остальные 77,78% предпочитают его не использовать. Из 54 человек 34 (62,96%) применяют подсолнечное рафинированное масло, 11 (20,37%) — подсолнечное нерафинированное масло, а 9 (16,67%) — сливочное масло. При этом было выявлено, что самой популярной маркой подсолнечного рафинированного масла среди местного населения является «Золотая семечка» (АО «Юг Руси», Россия) ($n = 21$ или 38,89%). При

варке рыбы респондентами чаще всего используется фильтрованная водопроводная вода ($n = 35$ или 64,81%). Варят рыбу обычно в эмалированной посуде ($n = 25$ или 46,30%) или в посуде из нержавеющей стали ($n = 12$ или 22,22%), а обжаривают в чугунной посуде ($n = 18$ или 33,33%) или в посуде с тефлоновым покрытием ($n = 11$ или 20,37%). Наиболее популярным материалом посуды для запекания рыбы стала глина ($n = 37$ или 68,52%), из которой изготавливают посуду, традиционно используемую для приготовления рыбы [16].

3.2. Изменение массы филе семги при различных кулинарных обработках

Кулинарная обработка каждым из используемых способов приводит к потере массы продукта, обусловленной испарением воды и прилипанием частиц продукта к посуде в ходе приготовления (Рисунок 3). Наибольшая средняя потеря массы отмечена при запекании. Причиной этому послужила высокая температура нагревания продукта, наивысшая в сравнении с другими способами обработки, что привело к наибольшему испарению жидкости из образца филе. При варке также были отмечены большие потери массы, что связано с отделением небольших частиц филе в бульон. При посоле потери массы оказались наименьшими. При обжаривании происходит и отделение частиц пробы, и испарение влаги, но эти факторы в меньшей степени влияют на убыль массы конечного продукта.



3.3. Содержание четырех токсичных и двух эссенциальных элементов в исходных образцах филе семги

В Таблице 1 представлены результаты химического анализа образцов семги до кулинарной обработки. В сравнении с ранее проведенными исследованиями [7,8,10] следует отметить ряд особенностей элементного состава проб *Salmo salar* L., используемых в настоящей работе. В частности, в сравнении с семгой с семгой, выловленной в водах Ненецкого автономного округа (НАО) [18], в исследуемых образцах существенно ниже уровень мышьяка (Таблица 1). Кроме того, содержания цинка и меди имеют более низкие концентрации, причем содержание Си в два и более раз выше уровня Zn в филе семги. В соответствии с Приложением 1 к Техническому регламенту ЕАЭС 040/2016⁵, показатели всех проб рыбы по какому-либо веществу не превышают установленных норм (Таблица 1).

Таблица 1. Содержание четырех токсичных и двух эссенциальных элементов в семге

Table 1. Content of four toxic and two essential elements in Atlantic salmon

Химический элемент	Настоящее исследование, р. Мезень*	Исследование 2017–2019 гг., р. Печора [18]	Допустимая концентрация
Ртуть, мкг/кг	62,8 ± 1,5	< 1,0	500
Мышьяк, мг/кг	0,323 ± 0,012	1,550 ± 0,499	5
Кадмий, мкг/кг	28,4 ± 2,1	0,3 ± 0,2	200
Свинец, мкг/кг	25,0 ± 3,1	2,6 ± 0,1	1000
Цинк, мг/кг	0,142 ± 0,052	6,650 ± 1,055	—
Медь, мг/кг	0,385 ± 0,014	1,068 ± 0,310	—

Примечание: * приведены средние геометрические значения ± стандартные отклонения ($n = 10$).

⁵ ТР ЕАЭС 040/2016 Технический регламент Евразийского экономического союза «О безопасности рыбы и рыбной продукции» (принят Решением Совета Евразийской экономической комиссии от 18 октября 2016 года № 162).

3.3. Ртуть

Ртуть является крайне токсичным соединением, которое наиболее сильно накапливается в высокой концентрации в рыбе, находящейся на вершине трофических цепей водных объектов. Сама же рыба является повсеместным продуктом питания, являющимся особенно важной частью рациона у жителей арктических или приарктических территорий. Следует отметить, что накопление ртути в организме рыб обусловлено концентрацией ее токсичных форм, при этом до 80% содержания ртути обнаруживается в виде метилртути (MeHg) [19]. В связи с вероятностью присутствия ртути в подобных формах содержание данного элемента в рыбе является одним из ключевых критериев безопасности в системе биомониторинга [20].

В случаях продолжительного потребления загрязненной рыбы содержание ртути в организме, как правило, увеличивается, что, в свою очередь, оказывает негативное воздействие на здоровье и самочувствие человека. Данные о влиянии кулинарной обработки на содержание ртути в пище противоречивы: исследователи приходят к противоположным выводам. Имеются как исследования, показывающие повышение концентрации ртути после кулинарной обработки, так и работы, в которых при аналогичных исходных условиях концентрация ртути уменьшалась.

В настоящем исследовании использовались образцы семги с содержанием ртути, характерным для уровня данного токсичного элемента в диких образцах лососей: не более 70 мкг/кг, в соответствии с [21]. В результате эксперимента продемонстрированы следующие результаты изменения содержания ртути в семге при кулинарной обработке (Рисунок 4). В среднем при приготовлении каждым из четырех способов количество содержащейся ртути уменьшается. Показано, что наименее эффективным в данном контексте способом является обжаривание, наиболее — варка.

На Рисунке 2 видно, что наиболее высокая концентрация ртути наблюдается при обжаривании, далее следуют запекание, посол и варка. При рассмотрении пробы варки, в которой учитывался и бульон, концентрация становится еще ниже. Заметна корреляция между потерей массы образца и концентрацией ртути в нем. Наибольшие потери массы наблюдаются при обжаривании и запекании, наименьшие — при варке. Ранее Гремячих с соавторами отмечали отсутствие влияния способа кулинарной обработки рыбы на абсолютное содержание ртути, используя в исследованиях речного окуня [6]. Другими авторами отмечено снижение уровня ртути в филе длиннохвостого тунца при обжаривании, но увеличение концентрации данного элемента при варке [22]. Безусловно, наблюдаемые различия в поведении ртути при различных способах приготовления рыбы зависят от ее исходной концентрации в сырье и от метода анализа. В настоящей работе впервые использованы 5 разнообразных способов приготовления дикой семги и проанализировано изменение содержания 4 токсичных и 2 эссенциальных элементов. Для ртути получена тенденция к снижению концентрации в филе семги при всех вариантах кулинарной обработки, особенно при варке.

3.4. Мышьяк

Неорганические соединения мышьяка, содержащиеся в рыбе, опасны для человека. При продолжительном употреблении в пищу рыбной продукции с повышенным уровнем содержания мышьяка он может вызывать проблемы с кожей, такие как очаговая гиперпигментация и гиперкератоз (утолщение кожи). Кроме того, мышьяк демонстрирует канцерогенные свойства, способствуя развитию рака кожи, легких и мочевого пузыря, а в некоторых случаях также рака печени и почек. Воздействие мышьяка также способно вызывать

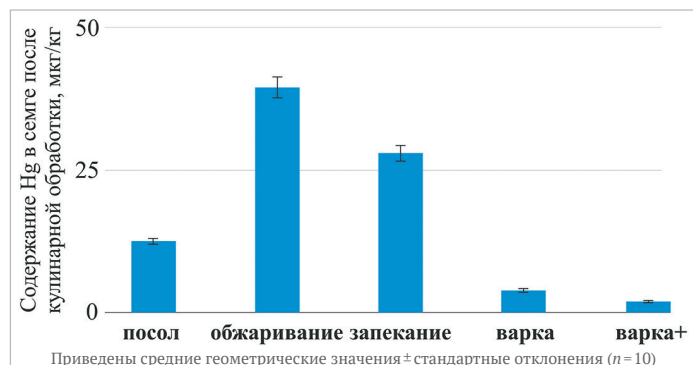


Рисунок 4. Содержание ртути в семге после приготовления
Figure 4. Content of mercury in Atlantic salmon after preparation

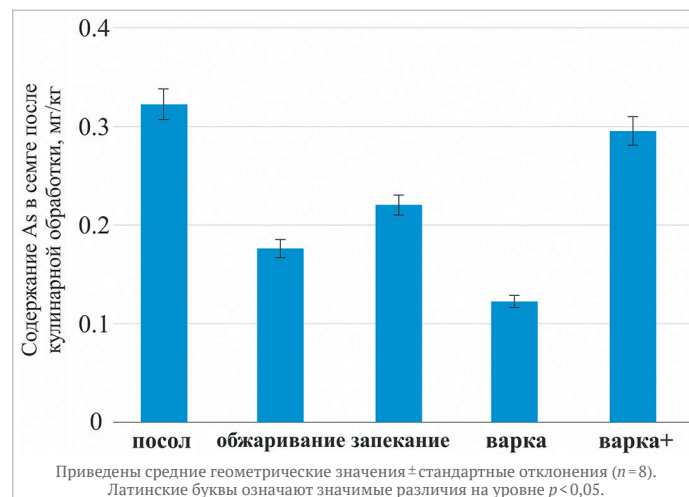
сердечно-сосудистые проблемы, включая аномальное сердцебиение, высокое кровяное давление и даже отказ системы кровообращения или гангрену. Ранее нами было показано, что в арктическом регионе уровень мышьяка в крови жителей в том числе связан с потреблением анадромных рыб, к которым относится семга, и достигает более 10 мкг/л [23]. Поэтому использование на севере в питании видов с высоким уровнем мышьяка рекомендуется ограничивать определенным группам населения, прежде всего детям и женщинам репродуктивного возраста. Известно, что у беременных женщин мышьяк может нарушать внутриутробное развитие плода, что приводит к низкому весу при рождении и к проблемам с гормональной и нервной системами [18].

Данные о мышьяке и влиянии кулинарной обработки на его концентрации также противоречивы и требуют дополнительных исследований. Так, в одной из работ проведен масштабный анализ поведения мышьяка при различных способах приготовления пищевых продуктов. Ученые пришли к выводу о том, что при варке рыбы ряд соединений мышьяка переходят в бульон, снижая его концентрацию в образцах вареного филе после отделения от жидкости [24]. Подобная тенденция характерна и для результатов нашего исследования (Рисунок 5). Видно, что концентрация мышьяка при варке уменьшается, однако в образцах, проанализированных вместе с бульоном, она, хотя и ниже исходного уровня, существенно превышает концентрацию в образцах после отделения бульона.

Известно, что в эндемичных по мышьяку регионах большинство термических процессов приготовления пищи приводят к значительному увеличению концентрации неорганического мышьяка [4]. Учитывая, что к таким территориям относят Арктику, следовало ожидать повышения концентрации данного токсичного элемента в филе семги при обжаривании и запекании, где температура приготовления выше, чем при обычной варке. Но, как мы отмечали ранее, в исследованиях использовались образцы семги с меньшим уровнем мышьяка, чем в рыбах того же вида из соседних крупных рек северо-запада Российской Федерации [10]. Следовательно, на полученные результаты повлиял ряд факторов: соотношение форм мышьяка в филе после приготовления, мобильность соединений при высокой температуре, взаимодействие As при относительно низкой концентрации с белково-липидной матрицей семги. Посол практически не повлиял на концентрацию мышьяка в приготовленной рыбе.

3.5. Свинец

Свинец, содержащийся в рыбе, представляет опасность для здоровья человека из-за своего токсического воздействия на организм. Он негативно влияет на четыре основные системы органов: кровеносную, нервную, желудочно-кишечную и почечную. В кровеносной системе свинец вызывает анемию, поскольку нарушает синтез гемоглобина и ускоряет гибель эритроцитов. Поражение центральной нервной системы проявляется снижением умственной способности, ухудшением памяти, агрессивным поведением и параличами мышц рук и ног. В желудочно-кишечном тракте острое отравление сопровождается потерей аппетита, болью. Также свинец оказывает токсическое воздействие на другие органы, например, почки, что может привести к нарушениям их функций [25,26]. Данные эффекты на организм



Приведены средние геометрические значения ± стандартные отклонения (n=8). Латинские буквы означают значимые различия на уровне p<0,05.

Рисунок 5. Содержание мышьяка в семге после приготовления
Figure 5. Content of mercury in Atlantic salmon after preparation

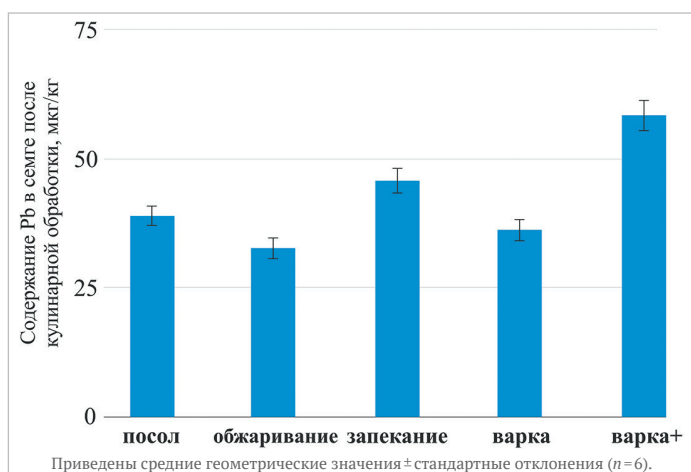


Рисунок 6. Содержание свинца в семге после приготовления
Figure 6. Content of lead in Atlantic salmon after preparation

могут иметь место при высоком уровне содержания этого токсичного элемента в пищевых продуктах. Например, в коммерческих видах рыбы концентрация Pb может достигать 6,95 мг/кг [27]. В наших исследованиях содержание свинца в 100–200 раз ниже этих значений, в зависимости от способа кулинарной обработки (Таблица 1).

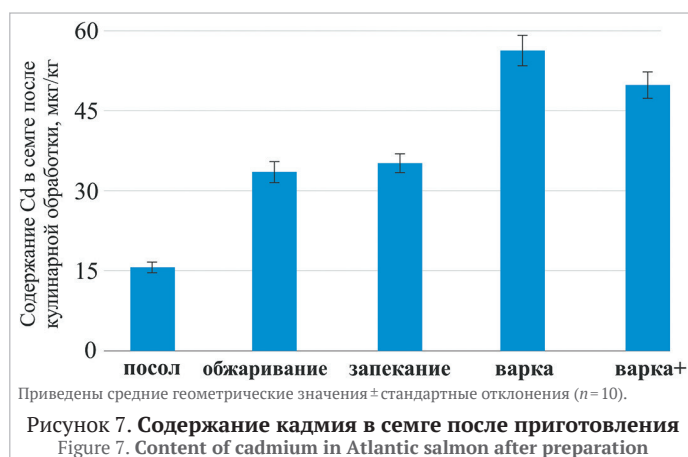
Результаты эксперимента свидетельствуют об увеличении содержания Pb после применения всех способов кулинарной обработки семги (Рисунок 6). Наибольшая концентрация свинца обнаружена в запеченном и вареном образцах с добавлением бульона. Учитывая низкое изначальное содержание, вероятно, большая часть свинца при варке поступает в воду и филе из посуды, используемой при готовке, увеличивая концентрацию данного элемента в сравнении с контрольным образцом. Повышенное количество свинца при запекании обуславливается потерей массы пробы, приводящей к повышению концентрации металла в образце. При прочих способах приготовления снижение уровня свинца не наблюдается, а на его концентрацию влияет ряд факторов, включая затруднение мобильности при малых концентрациях, воздействие металлической посуды и потерю массы. В исследовании Rajkowska-Myśliwiec и соавторов [10] проводился анализ семги, приготовленной несколькими способами с использованием различной посуды из разных материалов. Уровень свинца при обжаривании составил 60 мкг/кг, что несколько выше, чем показано на Рисунок 6.

3.6. Кадмий

Кадмий — тяжелый металл, не имеющий биологической функции в организме, накапливается в рыбе, так как имеет длительный период полувыведения. При употреблении загрязненной рыбы кадмий попадает в организм человека, накапливается в почках, печени и костях. Избыток кадмия ингибирует активность ферментов, нарушая метаболические процессы, и вызывает окислительный стресс, повреждая клеточные мембраны и ДНК. Несмотря на то, что, как правило, рыба не может существенно оказывать влияние на уровень кадмия в организме человека, в ряде загрязненных регионов концентрация данного токсичного элемента в тканях морских представителей ихтиофауны может достигать 3,76 и более мг/кг [27,28]. Полученные нами данные свидетельствуют о невысоком исходном значении, не превышающем 0,1 мг/кг (Таблица 1).

Наибольшая концентрация кадмия в филе семги обнаружена при варке (Рисунок 7). Единственный способ приготовления, при котором концентрация кадмия снижается — посол. Abbas с соавторами [29] уже демонстрировали подобный эффект для мокрого способа посола карпа. Уровни кадмия при обжаривании и запекании сходны, что может быть следствием общей схожести этих двух способов приготовления рыбы. При этом корреляции между содержанием кадмия и способом кулинарной обработки не обнаружена, что во многом объясняется низким ее значением. Однако, в сравнении с работой [10], где содержание кадмия после обжаривания форели составляло 10 мкг/кг, в нашем исследовании уровень данного токсичного элемента выше (Рисунок 7), что во многом связано с более высоким исходным содержанием в используемых образцах семги (Таблица 1).

Выведение токсичных элементов из продукта питания — одна из многих задач кулинарной обработки. В зависимости от типа загрязнения продукта, преобладающего в нем токсичного вещества, стоит подобрать наиболее подходящий способ кулинарной обработки. В исследуемых нами образцах показатели концентрации токсичных



Приведены средние геометрические значения \pm стандартные отклонения ($n = 10$).

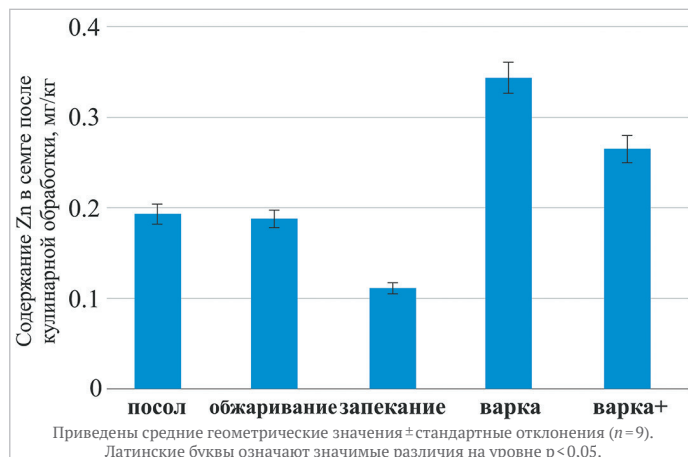
Рисунок 7. Содержание кадмия в семге после приготовления
Figure 7. Content of cadmium in Atlantic salmon after preparation

элементов находятся в пределах рекомендуемых нормативов, что позволяет потребителю выбирать способ приготовления филе, исходя из исключительности из своих вкусовых предпочтений.

3.7. Цинк

Цинк — жизненно важный микроэлемент, играющий ключевую роль в синтезе ферментов, обмене белков и гормонов, поддержании репродуктивной функции и иммунной защиты организма. Морепродукты являются наилучшим источником цинка для человека. Дефицит цинка приводит к различным патологическим состояниям, таким как утомляемость, снижение памяти, ослабление иммунитета [30]. Важной особенностью цинка в живых организмах является его способность к снижению абсорбции кадмия и свинца в желудочно-кишечном тракте и влияние на аккумуляцию свинца в различных тканях [27]. Но данное вещество может быть опасно при значительных передозировках, например, при продолжительном употреблении в пищу рыбы с повышенной концентрацией цинка. Это может привести к быстрой утомляемости, анемии.

Уровень данного эссенциального элемента в исследуемых исходных образцах семги в 5 и более раз ниже, чем в образцах, ранее изученных в северо-западном секторе Российской Арктики [18,23,31]. Содержание цинка в филе семги максимально при варке (Рисунок 8). Также увеличенные значения концентрации данного эссенциального элемента в сравнении с контролем характерны для обжаривания и посола. При запекании, напротив, наблюдается снижение уровня цинка. Связано это с обогащением воды цинком во время фильтрации. При посоле увеличение концентрации цинка может быть обусловлено внесением элемента с солью. Пониженная же концентрация при запекании может быть обусловлена образованием более подвижных форм цинка при максимальной температуре среди всех используемых способов кулинарной обработки. Сопоставляя полученные результаты с литературными данными, можно найти сходство. Например, в работе [15] продемонстрирована концентрация цинка при запекании, равная 0,45 мг/кг. В статье канадских исследователей [11] отмечена концентрация цинка в запеченной радужной форели (представителе лососевых), равная 0,510 мг/кг. Следовательно, в немногочисленных научных работах есть сопоставимые данные, но только по отдельным способам приготовления и элементам.



Приведены средние геометрические значения \pm стандартные отклонения ($n = 9$).

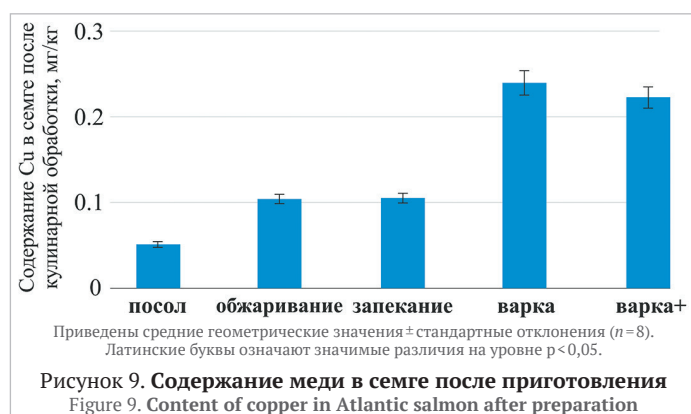
Латинские буквы означают значимые различия на уровне $p < 0,05$.

Рисунок 8. Содержание цинка в семге после приготовления
Figure 8. Content of zinc in Atlantic salmon after preparation

3.8. Медь

Семга является одним из наиболее богатых медью видов рыб, что повышает ее ценность как пищевого ресурса в Арктике [32–34]. В водных экосистемах, подверженных серьезной антропогенной нагрузке по неорганическим соединениям, рыба способна накапливать данный эссенциальный элемент в концентрациях, опасных для потребления человеком. Она обладает высоким уровнем биоаккумуляции в тканях, что может привести к различным нарушениям здоровья [33]. Избыток меди может блокировать активные центры ферментов, нарушая их функции и приводя к изменению метаболических процессов. Кроме того, высокая концентрация меди может вызывать окислительный стресс, повреждая клеточные мембраны и ДНК.

Исследования влияния различных термических методов кулинарной обработки пищевого сырья выявляли закономерность снижения уровня меди в биомассе [33]. Подобная закономерность выявлена и в нашей работе, особенно это характерно для варки (Рисунок 9). Наибольшие потери меди отмечены при посоле, что может быть связано с эффектом высаливания данного элемента в связи с большим содержанием хлорида натрия, используемого в данном



способе приготовления. Схожий эффект обнаружен в работе египетских исследователей при приготовлении мокро-соленого карпа с использованием 15 % раствора соли [29].

В вопросе сохранения эссенциальных элементов варка является предпочтительной в сравнении с другими способами [22]. В момент приготовления филе вода насыщает рыбу цинком, но из-за невысокой температуры, которой подвергается продукт, потери меди наименьшие. Обжаривание тоже может считаться подходящим для сохранения эссенциальных элементов способом, так как потери меди при нем не так велики, как при посоле, а концентрация цинка увеличивается в сравнении с контролем, в отличие от запекания.

4. Выводы

В ходе проведенного исследования было проанализировано влияние 4 способов кулинарной обработки филе семги, используемой в питании жителями Мезенского округа Архангельской области. Исходя из полученных результатов и информации о влиянии каждого из способов на анализируемые соединения, можно сделать выводы о наиболее предпочтительных способах приготовления рыбы. Обжаривание и запекание имеют схожие результаты изменения концентрации веществ, оба способа относительно хорошо понижают концентрации ртути, меди и мышьяка, на остальные вещества их влияние не так велико. Посол в связи с отсутствием термической обработки имеет либо очень сильное влияние на концентрацию вещества (ртуть, кадмий, медь), либо минимальное (свинец, мышьяк, цинк). Минимальное воздействие посола распространяется на два из четырех исследуемых токсичных веществ. Наиболее предпочтительным способом кулинарной обработки является варка семги. Этот способ приготовления существенно снижает концентрации токсичных веществ, но лучше всего сохраняет в рыбе эссенциальные элементы (цинк и медь). Важно отметить, что при варке большое количество таких токсичных веществ, как мышьяк и свинец, переходит в бульон. Поэтому при высоком уровне этих элементов в исходной рыбе рекомендуется употреблять вареную рыбу отдельно от него. Эссенциальные вещества в бульоне тоже сохраняются, однако их количество не так велико относительно их концентрации непосредственно в филе семги.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / REFERENCES

- Генрих, Э. А., Торцев, А. М. (23–24 марта 2023). *Результаты мониторинга нерестовой части популяции Атлантического лосося в низовьях р. Мезень*. Материалы Всероссийской научно-практической конференции «Лососевые рыбы: биология, воспроизводство, промысел» Мурманск: Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии, 2023. [Genrikh, E. A., Tortsev, A. M. (March 23–24, 2023). *Results of the monitoring of the spawning part of the Atlantic salmon population in the lower part of the Mezen River*. Papers from the Russian National Scientific Conference "Salmonoids: biology, reproduction, fisheries". Murmansk: Polar Branch of the Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography, 2023. (In Russian)]
- Комелина, Н. Г. (2023). Промысловые обычаи жителей Зимнего берега Белого моря: по архивным материалам 1930-х гг. и экспедиционным записям 2007–2019 гг. *Фольклор: структура, типология, семиотика*, 6(1), 93–138. [Kemelina N. G. (2023). Fishing customs of the inhabitants of the Winter Coast of the White Sea. Based on archival materials of the 1930s and expedition records 2007–2019. *Folklore: Structure, Typology, Semiotics*, 6(1), 93–138. (In Russian)]
- Шкунов, В. Н. (2025). Промысел семги на Русском Севере в XIX в. *In Situ*, 9, 17–21. [Shkunov, V. N. (2025). Salmon fishing in the Russian North in the 19th. *In Situ*, 9, 17–21. (In Russian)]
- Скурихин, И. М., Тутельян, В. А. (2002). Химический состав российских пищевых продуктов. Москва: Де Ли принт, 2002. [Skurikhin, I. M., Tuteliyan, V. A. (2002). Chemical composition of Russian food products. Moscow: De Li print, 2002. (In Russian)]
- Brooks, K. M., Mahnken, C. V. W. (2003). Interactions of Atlantic salmon in the Pacific Northwest environment: III. Accumulation of zinc and copper. *Fisheries Research*, 62(3), 295–305. [https://doi.org/10.1016/S0165-7836\(03\)00065-1](https://doi.org/10.1016/S0165-7836(03)00065-1)
- Гремячих, В. А., Томилина, И. И., Комов, В. Т. (2007). Влияние кулинарной обработки на содержание ртути в рыбе. *Гигиена и санитария*, 6, 64–67. [Gremyachikh, V. A., Tomilina, I. I., Komov, V. T. (2007). The effect of cooking on the mercury content in fish. *Hygiene and Sanitation, Russian Journal*, 6, 64–67. (In Russian)]
- Devesa, V., Vélez D., Montoro, R. (2008). Effect of thermal treatments on arsenic species contents in food. *Food and Chemical Toxicology*, 46(1), 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2007.08.021>
- Khristoforova, N. K., Tsygankov, V. Y., Boyarova, M. D., Lukyanova, O. N. (2015). Concentrations of trace elements in Pacific and Atlantic salmon. *Oceanology*, 55, 679–685. <https://doi.org/10.1134/S0001437015050057>
- Че, С. Н., Бакайтис, В. И., Цапалова, И. Э. (2015). Влияние тепловой обработки на физические показатели и содержание тяжелых металлов в макробицах. *Техника и технология пищевых производств*, 2(37), 138–143. [Che, S. N., Bakaytis, V. I., Tsapalova, I. E. (2015). Influence of heat treatment on macro-
- mycete physical characteristics and the content of heavy metals in them. *Food Processing: Techniques and Technology*, 2(37), 138–143. (In Russian)]
- Rajkowska-Myśliwiec, M., Pokorska-Niewiada, K., Witczak, A., Balcerzak, M., Ciechowska-Juśko, D. (2023). Health benefits and risks associated with element uptake from grilled fish and fish products. *Journal of The Science of Food and Agriculture*, 102(3), 957–964. <https://doi.org/10.1002/jsfa.11429>
- Sheeshka, J., Murkin, E. (2002). Nutritional aspects of fish compared with other protein sources. *Comments on Toxicology*, 8(4–6), 375–397. <https://doi.org/10.1080/08865140215065>
- Захаров, А. Б., Мазук, М. А. (2015). Рыбы и рыбный промысел на реке Мезень: исторические аспекты. *Вестник института биологии Коми научного центра Уральского отделения РАН*, 5(193), 34–41. [Zakharov, A. B., Matsuk, M. A. (2015). Fish and fishery on the Mezen river. Historical aspects. *Vestnik of Institute of Biology of Komi Scientific Center of Ural Branch of RAS*, 5(193), 34–41. (In Russian)]
- Прусов, С. В. (2005). История рыболовства атлантического лосося в р. Поной, Кольский полуостров. Сборник статей «Лососевидные рыбы Восточной Фенноскандии». Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2005. [Prusov, S. V. (2005). History of Atlantic salmon fisheries in the Ponoï river, Rola peninsula. Proceedings "Salmonid fish of Eastern Fennoscandia". Petrozavodsk: Karelian Research Centre of RAS, 2005. (In Russian)]
- Торцев, А. М. (2020). Регулирование промысла лосося атлантического (семги) на реке Северная Двина. *Известия КИТУ*, 58, 49–61. [Tortsev, A. M., Studenov, I. I., Chupov, D. V. (2020). Regulatory activities of Atlantic salmon fishery in the North Dvina River. *KSTU News*, 58, 49–61. (In Russian)]
- Черемухина, Л. А. (1992). Рыбный бульон. Глава в книге: Северная кухня. Архангельск: Северо-западное книжное издательство, 1992. [Cheremukhina, L. A. (1992). Fish broth. Chapter in a book: Nordic cuisine. Arkhangelsk: North-Western Book Publishing House, 1992. (In Russian)]
- Филин, Ф. П. (1980). Словарь русских народных говоров. Ленинград: Наука. Ленинградское отделение, 1980. [Filin, F. P. (1980). Dictionary of Russian folk dialects. Leningrad: Nauka. Leningrad branch, 1980. (In Russian)]
- Shapiro, S. S., Wilk, M. B., Chen, H. J. (1968). A comparative study of various tests for normality. *Journal of the American Statistical Association*, 63(324), 1343–1372. <https://doi.org/10.1080/01621459.1968.10480932>
- Sobolev, N., Nieboer, E., Aksenov, A., Sorokina, T., Chashchhin, V., Ellingsen, D. G. et al. (2019). Concentration dataset for 4 essential and 5 non-essential elements in fish collected in Arctic and sub-Arctic territories of the Nenets Autonomous and Arkhangelsk regions of Russia. *Data in Brief*, 27, Article 104631. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2019.104631>
- Arroyo-Abad, U., Pfeifer, M., Mothes, S., Stärk, H.-J., Piechotta, C., Mattusch, J. et al. (2016). Determination of moderately polar arsenolipids and mercury specia-

tion in freshwater fish of the River Elbe (Saxony, Germany). *Environmental Pollution*, 208(Part B), Article 458–466. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2015.10.015>

20. Sorokina, T. Y. (2022). Pollution and monitoring in the Arctic. Chapter in a book: *Global Arctic*. Springer, Cham., 2022. https://doi.org/10.1007/978-3-030-81253-9_12

21. Jensen, I.-J., Eilertsen, K.-E., Otnæs, C. H. A., Mæhre, H. K., Elvevoll, E. O. (2020). An update on the content of fatty acids, dioxins, PCBs and heavy metals in farmed, escaped and wild Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) in Norway. *Foods*, 9(12), Article 1901. <https://doi.org/10.3390/foods9121901>

22. Kazemi, A., Esmailbeigi, M., Ansari, A., Ghanavati, A., Mohammadzadeh, B. (2022). Alterations and health risk assessment of the environmental concentration of heavy metals in the edible tissue of marine fish (*Thunnus tonggol*) consumed by different cooking methods. *Regional Studies in Marine Science*, 53, Article 102361. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2022.102361>

23. Sorokina, T., Sobolev, N., Belova, N., Aksenov, A., Kotsur, D., Trofimova, A. et al. (2022). Diet and blood concentrations of essential and non-essential elements among rural residents in Arctic Russia. *Nutrients*, 14(23), Article 5005. <https://doi.org/10.3390/nu14235005>

24. Zhang, C., Miao, X., Du, S., Zhang, T., Chen, L., Liu, Y. et al. (2023). Effects of culinary procedures on concentrations and bioaccessibility of Cu, Zn, and As in different food ingredients. *Foods*, 12(8), Article 1653. <https://doi.org/10.3390/foods12081653>

25. Bernard, B. P., Becker, C. E. (1988). Environmental lead exposure and the kidney. *Journal of Toxicology: Clinical Toxicology*, 26(1–2), 1–34. <https://doi.org/10.3109/15563658808995395>

26. Горбачев, А. Л. (2025). Микроэлементный статус и здоровье жителей северных регионов: научный обзор. *Экология человека*, 32(4), 225–238. [Gorbachev, A. L. (2025). Trace element status and health of Northern populations: A scientific review. *Human Ecology*, 32(4), 225–238.] <https://doi.org/10.17816/humeco646046>

27. Türkmen, A., Türkmen, M., Tepe, Y., Akyurt, I. (2005). Heavy metals in three commercially valuable fish species from İskenderun Bay, Northern East Mediterranean Sea, Turkey. *Food Chemistry*, 91(1), 167–172. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2004.08.008>

28. Abdallah, M. A. M. (2008). Trace element levels in some commercially valuable fish species from coastal waters of Mediterranean Sea, Egypt. *Journal of Marine Systems*, 73(1–2), 114–122. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2007.09.006>

29. Abbas, M. M. M., Shehata, S. M., Talab A. S., Mohamed, M. H. (2022). Effect of traditional processing methods on the cultivated fish species, Egypt. Part I. Mineral and heavy metal concentrations. *Biological Trace Element Research*, 200, 2391–2405. <https://doi.org/10.1007/s12011-021-02840-w>

30. Tsuda, T., Inoue, T., Kojima, M., Aoki, S. (1995). Market basket and duplicate portion estimation of dietary intakes of cadmium, mercury, arsenic, copper, manganese, and zinc by Japanese adults. *Journal of AOAC International*, 78(6), 1363–1368.

31. Allen-Gil, S. M., Martynov, V. G. (1995). Heavy metal burdens in nine species of freshwater and anadromous fish from Pechora River, northern Russia. *The Science of Total Environment*, 160/161, 653–659. [https://doi.org/10.1016/0048-9697\(95\)93634-t](https://doi.org/10.1016/0048-9697(95)93634-t)

32. Ahmed, A. S. S., Sultana, S., Habib, A., Ullah, H., Musa, N., Hossain, M. B. et al. (2019). Bioaccumulation of heavy metals in some commercially important fishes from a tropical river estuary suggests higher potential health risk in children than adults. *PLOS One*, 14(10), Article e0219336. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0219336>

33. Bastias, J. M., Balladares, P., Acuña, S., Quevedo, R., Muñoz, O. (2017). Determining the effect of different cooking methods on the nutritional composition of salmon (*Salmo salar*) and chilean jackmackerel (*Trachurus murphyi*) filets. *PLOS One*, 12(7), Article e0180993. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0180993>

34. Kokkali, M., Sveen, L., Larsson, T., Krasnov, A., Giakoukakis, A., Sweetman, J. et al. (2023). Optimisation of trace mineral supplementation in diets for Atlantic salmon smolt with reference to holistic fish performance in terms of growth, health, welfare, and potential environmental impacts. *Frontiers in Physiology*, 14, Article 1214987. <https://doi.org/10.3389/fphys.2023.1214987>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ		AUTHOR INFORMATION	
Принадлежность к организации		Affiliation	
Виров Аркадий Игоревич — лаборант-исследователь, лаборатория арктического биомониторинга, Северный (Арктический) федеральный университет имени М. В. Ломоносова 163002, Архангельск, набережная Северной Двины, 17 E-mail: a.virov@narfu.ru ORCID: https://orcid.org/0009-0003-9734-356X * автор для контактов		Arkadiy I. Virov , Laboratory Assistant, Arctic Biomonitoring Laboratory, Northern (Arctic) Federal University named after M. V. Lomonosov 17, Naberezhnaya Severnoy Dvini, 163002, Arkhangelsk, Russia E-mail: a.virov@narfu.ru ORCID: https://orcid.org/0009-0003-9734-356X * corresponding author	
Аксенов Андрей Сергеевич — кандидат технических наук, доцент, профессор, кафедра биологии, экологии и биотехнологии, Северный (Арктический) федеральный университет имени М. В. Ломоносова 163002, Архангельск, набережная Северной Двины, 17 E-mail: a.s.aksenov@narfu.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1013-1357		Andrey S. Aksenov , Candidate of Technical Sciences, Docent, Professor, Department of Biology, Ecology and Biotechnology, Northern (Arctic) Federal University named after M. V. Lomonosov 17, Naberezhnaya Severnoy Dvini, 163002, Arkhangelsk, Russia E-mail: a.s.aksenov@narfu.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1013-1357	
Сорокина Татьяна Юрьевна — кандидат юридических наук, заведующий лабораторией арктического биомониторинга, Северный (Арктический) федеральный университет имени М. В. Ломоносова 163002, Архангельск, набережная Северной Двины, 17 E-mail: t.sorokina@narfu.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4873-8747		Tatiana Yu. Sorokina , Candidate of Law Sciences, Head of the Arctic Biomonitoring Laboratory, Northern (Arctic) Federal University named after M. V. Lomonosov 17, Naberezhnaya Severnoy Dvini, 163002, Arkhangelsk, Russia E-mail: t.sorokina@narfu.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4873-8747	
Критерии авторства		Contribution	
Авторы в равных долях имеют отношение к написанию рукописи и одинаково несут ответственность за плагиат.		The authors has the sole responsible for writing the manuscript and es responsible levant for plagiarism.	
Конфликт интересов		Conflict of interest	
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.		The authors declare no conflict of interest.	