

Том 56, № 2, 2026
Vol. 56, № 2, 2026

ISSN 2074-9414
ISSN 2313-1748

ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИЯ ПИЩЕВЫХ ПРОИЗВОДСТВ

Food Processing:
Techniques and Technology



1} Кемеровский
государственный
университет
Объединяем
знания и людей

Национальный, рецензируемый научный журнал, посвященный вопросам пищевой промышленности и смежных отраслей. Журнал включен в SCOPUS, RSCI, ЕГПНИ (Белый список) – первый уровень, Перечень ВАК (категория К1).

Миссия: создание, агрегация, поддержка и распространение научно-образовательного контента в области пищевой промышленности, объединение усилий различных категорий исследователей, вузовской и научной

интеллигенции, 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, а также оказывать содействие в процессе подготовки высококвалифицированных специалистов.

В журнале публикуются научные и обзорные статьи, краткие научные сообщения по направлениям: пищевые системы; биотехнология; технология пищевых производств; санитария и гигиена; экология; биобезопасность; частная зоотехния; экономика; электротехнологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса.

Подробная информация для авторов и читателей представлена на сайте <https://fptt.ru>

Главный редактор:

Просеков Александр Юрьевич, академик РАН, д-р техн. наук, д-р биол. наук, Кемеровский государственный университет, Кемерово, Россия.

Зам. главного редактора:

Бабич Ольга Олеговна, д-р техн. наук, Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта, Калининград, Россия.

Редакционная коллегия:

Абакумов Евгений Васильевич, профессор РАН, д-р биол. наук, Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия;

Алтухов Игорь Вячеславович, д-р техн. наук, ООО «Промышленные технологические инновации», Иркутск, Россия;

Бахарев Владимир Валентинович, д-р хим. наук, Самарский государственный технический университет, Самара, Россия;

Бычкова Светлана Михайловна, д-р экон. наук, Гатчинский государственный университет, Гатчина, Россия;

Галстян Арам Генрихович, академик РАН, д-р техн. наук, Всероссийский научно-исследовательский институт молочной промышленности, Москва, Россия;

Ганиева Ирина Александровна, д-р экон. наук, АНО «Научно-образовательный центр «Кузбасс», Кемерово, Россия;

Гриценко Галина Михайловна, д-р экон. наук, Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий РАН, Краснообск, Россия;

Заушинцева Александра Васильевна, д-р биол. наук, Кемеровский государственный университет, Кемерово, Россия;

Йианг Ююн, Ph. D., Колледж пищевых наук Северо-Восточного сельскохозяйственного университета, Харбин, Китай;

Капанова Анна Борисовна, д-р физ.-мат. наук, Ярославский государственный технический университет, Ярославль, Россия;

Кашеваров Николай Иванович, академик РАН, д-р с.-х. наук, Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий РАН, Краснообск, Россия;

Лобанов Владимир Григорьевич, д-р техн. наук, Кубанский государственный технологический университет, Краснодар, Россия;

Фролова Ольга Алексеевна, д-р экон. наук, Нижегородский государственный инженерно-экономический университет, Княгинино, Россия;

Хмелев Владимир Николаевич, д-р техн. наук, Бийский технологический институт Алтайского государственного технического университета, Бийск, Россия;

Хотимченко Юрий Степанович, д-р биол. наук, Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Россия;

Шахов Сергей Васильевич, д-р техн. наук, Воронежский государственный университет инженерных технологий, Воронеж, Россия;

Юдаев Игорь Викторович, д-р техн. наук, Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина, Краснодар, Россия.

Материалы публикуются на условиях лицензии CC BY 4.0.

Выпускающий редактор: А.И. Лосева

Ответственный за выпуск: Е.В. Дмитриева

Литературный редактор: Э.Р. Шакирзянова

Литературный редактор (англ. язык):

Н.В. Рабкина

Корректор: Э.Р. Шакирзянова

Дизайн и компьютерная верстка: Е.В. Волкова

Учредитель, издатель и редакция: Кемеровский государственный университет, 650000, Россия, Кемеровская обл. – Кузбасс, г. Кемерово, Красная, 6

тел.: +7 (3842) 58-80-24

e-mail: fptt98@gmail.com

Адрес типографии: Кемеровский государственный университет, 650000, Россия, Кемеровская обл. – Кузбасс, г. Кемерово, пр. Советский, 73

Дата выхода в свет 30.06.26

Усл. п. л. 26,85. Тираж 500 экз.

Цена свободная. Выходит 4 раза в год

Подписной индекс по интернет-каталогу агентства «Урал-Пресс» – 41672

Регистрационный номер СМИ серия ПИ № ФС77-72313 выдан Роскомнадзор

© Составление, сопроводительный текст, редакционно-издательское оформление, Кемеровский государственный университет, 2026

<https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-2-2638>
<https://elibrary.ru/DFQZNM>

Информационная статья
<https://fptt.ru>

Академик Александр Юрьевич Просеков (к 50-летию со дня рождения)



С. А. Иванова^{1,*}, О. О. Бабич², О. В. Кригер³,
Ю. В. Голубцова⁴, Т. В. Вобликова⁵

¹ Кемеровский государственный университет^{ROR}, Кемерово, Россия

² Балтийский федеральный университет им. И. Канта^{ROR}, Калининград, Россия

³ Национальный исследовательский университет ИТМО^{ROR}, Санкт-Петербург, Россия

⁴ Российская государственная специализированная академия искусств^{ROR}, Москва, Россия

⁵ Кубанский государственный технологический университет^{ROR}, Краснодар, Россия

*e-mail: pavvm2000@mail.ru

© С. А. Иванова, О. О. Бабич, О. В. Кригер, Ю. В. Голубцова,
Т. В. Вобликова, 2026



Аннотация.

Статья посвящена научной и профессиональной деятельности Александра Юрьевича Просекова – выдающегося ученого в области пищевых и сельскохозяйственных биотехнологий, академика (действительного члена) Российской академии наук, доктора технических наук, доктора биологических наук, профессора, лауреата премии Правительства РФ в области науки и техники для молодых ученых 2008 г., заслуженного работника высшей школы РФ, почетного работника высшего профессионального образования РФ. Представленный обзор охватывает результаты многолетней научной деятельности, направленной на разработку инновационных технологий производства пищевых продуктов, включая специализированное и функциональное питание; изучение вопросов продовольственной безопасности, экологического мониторинга и рационального природопользования и др. В рамках научной школы имени Л. А. Остроумова, получившей в 2020 г. грант Президента РФ на государственную поддержку научных школ Российской Федерации (НШ-2694.2020.4) и признание в области прикладной биотехнологии, под руководством Александра Юрьевича защищено 44 кандидатских и 15 докторских диссертаций. Комплексный подход к решению проблем современной биотехнологии, включающий разработку новых методов получения биологически активных веществ, создание эффективных биопрепаратов и технологий их применения, характерен для исследований, проводимых участниками этой научной школы. Перспективность полученных научных результатов определяется их актуальностью для решения современных задач в области продовольственной безопасности, развития экологически чистых технологий производства и создания инновационных продуктов питания. Научные выводы открывают новые возможности для развития биотехнологий и пищевой промышленности, способствуя повышению качества и безопасности пищевых продуктов.

Ключевые слова. А. Ю. Просеков, академик РАН, лауреат премии правительства РФ в области науки и техники, научная школа, биотехнология, пищевые технологии

Для цитирования: Иванова С. А., Бабич О. О., Кригер О. В., Голубцова Ю. В., Вобликова Т. В. Академик Александр Юрьевич Просеков (к 50-летию со дня рождения). Техника и технология пищевых производств. 2026. Т. 56. № 2. С. 203–220. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-2-2638>

Academician of the Russian Academy of Sciences Alexander Yu. Prosekov: On His 50th Birthday



Svetlana A. Ivanova^{1,*}, Olga O. Babich², Olga V. Kriger³,
Yuliya V. Golubtsova⁴, Tatyana V. Voblikova⁵

¹ Kemerovo State University^{ROR}, Kemerovo, Russia

² Immanuel Kant Baltic Federal University^{ROR}, Kaliningrad, Russia

³ ITMO University^{ROR}, Saint-Petersburg, Russia

⁴ Russian State Specialized Academy of Arts^{ROR}, Moscow, Russia

⁵ Kuban State Technological University^{ROR}, Krasnodar, Russia

*e-mail: pavvm2000@mail.ru

© S.A. Ivanova, O.O. Babich, O.V. Kriger, Yu.V. Golubtsova,
T.V. Voblikova, 2026



Abstract.

Professor Alexander Yu. Prosekov is a prominent scientist in food and agricultural biotechnology, a academician of the Russian Academy of Sciences, and a Doctor of Science in Biology and Engineering. In 2008, he was awarded the Russian Federation Government Prize in Science and Technology for Young Scientists. This review highlights his extensive contributions to innovative food technologies and functional foods. Carrying forward Professor L. A. Ostroumov's scientific school, which received a 2020 Presidential Grant for the support of leading national research schools (NSh-2694.2020.4), Professor Prosekov has supervised 44 PhD and 15 Doctoral theses. His students follow an integrated approach to biotechnological challenges, developing novel methods for bioactive substance recovery and advanced biomedicines. Their research significantly contributes to national food security, sustainable production, and food innovation. Under Professor Prosekov's leadership, his research school continues to advance the frontiers of biotechnology and the food industry, ensuring the quality and safety of domestic products.

Keywords. A. Yu. Prosekov, academician of the Russian Academy of Sciences, Russian Government Prize in Science and Technology, scientific school, biotechnology, food technology

For citation: Ivanova SA, Babich OO, Kriger OV, Golubtsova YuV, Voblikova TV. Academician of the Russian Academy of Sciences Alexander Yu. Prosekov: On His 50th Birthday Food Processing: Techniques and Technology. 2026;56(2):203–220. (In Russ.) <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-2-2638>

Введение

1 мая 2026 года исполнилось 50 лет со дня рождения академика РАН Александра Юрьевича Просекова – известного российского биотехнолога, доктора технических и биологических наук, профессора. Сфера его научных интересов носит междисциплинарный характер и охватывает такие актуальные области, как биотехнологии, здоровьесбережение, агробиотехнологии, а также разработку технологий рационального и устойчивого развития природопользования.

Просеков Александр Юрьевич в 1998 г. с отличием окончил Кемеровский технологический институт пищевой промышленности (КемТИПП). Дальнейшая научная и профессиональная жизнь связана с этим институтом, ныне – Кемеровский государственный университет (КемГУ). Он прошел все ступени научной и профессиональной карьеры: от аспиранта до академика РАН, от ассистента до ректора. В должности проректора

по научной работе КемТИПП, а позднее и на посту ректора, А. Ю. Просеков приложил значительные усилия к улучшению материально-технической базы института. Он сыграл ключевую роль в укреплении Кемеровского государственного университета при объединении с Кемеровским технологическим институтом пищевой промышленности. Благодаря его эффективному управлению КемГУ приобрел статус опорного университета Кемеровской области, став ключевым звеном в системе социально-экономического развития Кузбасса.

В 1999 г. Александр Юрьевич под руководством профессора, доктора наук Льва Александровича Остроумова, защитил кандидатскую диссертацию по теме «Разработка технологии молочных продуктов со сбивной структурой с использованием растительного сырья», в 2004 г. – докторскую диссертацию «Теоретическое обоснование и технологические принципы формирования молочных пенообразных дисперсных систем».

На рубеже веков развитие технологий переработки молока являлось ключевым аспектом государственной политики в сфере продовольственной безопасности населения новой России. Молоко – ценный источник белков, липидов, углеводов и минеральных солей – служит основой для производства широкого спектра пищевых продуктов. Исследование методов оптимизации производства таких продуктов, включающих пенообразующие системы, оставалось актуальным. В молочной промышленности пенообразование часто рассматривали как нежелательный процесс, приводящий к потерям молочного жира и других компонентов. Однако на рынке наблюдался спрос на новые виды молочных продуктов со взбитой структурой: суфле, коктейли, муссы, кремы. Разработка их технологий открывала возможности для расширения ассортимента и повышения конкурентоспособности предприятий. Следовательно, управляемое создание пенообразных систем в продуктах со взбитой структурой требовало углубленного понимания процессов и разработки инструментов управления ими. Несмотря на значительное число исследований, посвященных получению пенообразных масс применительно к пищевому производству, в частности молочному, проблематика оставалась малоизученной, физико-химические свойства и механизмы формирования пенных структур не были раскрыты. Проведенное исследование позволило сформулировать новые теоретические положения в сфере коллоидной химии и технологии молочных продуктов. Автором были обоснованы физико-химические закономерности формирования молочных пенообразных дисперсных систем, установлены биотехнологические принципы пенообразования и разработаны концепции управления этими процессами. Научные результаты исследования включали: классификацию молочных пенообразных дисперсных систем, учитывающую уровни характеристик пенообразных масс; методологию анализа пенных систем и принципы улучшения их качественных характеристик; регламенты выработки взбитых продуктов на основе молока, сливок и белково-углеводного сырья; методы контроля качества таких продуктов. Полученные результаты имели непосредственное практическое значение и стали основой для разработки новых технологий, в т. ч. в сфере функционального питания, позволив создавать продукты с улучшенными органолептическими и функциональными свойствами. Под руководством Александра Юрьевича уже были выполнены следующие исследования: «Исследование и разработка биотехнологии взбитых молочных продуктов» (О. Е. Просекова, 2002 г.); «Исследование и разработка технологии взбитых белковых продуктов» (М. Г. Курбанова, 2005 г.); «Разработка и исследование технологии молочных продуктов на основе газожидкостных дисперсных систем» (Е. В. Строева, 2006 г.); «Исследование пневматического вспенивания и разработка технологии аэрированных альбуминных напитков» (И. Г. Кулинчик, 2008 г.);

«Интенсификация технологий молочных продуктов на основе газожидкостных дисперсных систем и молочнo-белковых концентратов» (С. А. Иванова, 2012 г.).

В 2008 г. Александр Юрьевич Просеков совместно с коллективом авторов под руководством Льва Александровича Остроумова стал лауреатом премии Правительства Российской Федерации в области науки и техники для молодых ученых. Награда была присуждена за разработку технологий и аппаратного оформления производства молочных продуктов нового поколения на основе многофазных дисперсных структур.

В 2011 г. А. Ю. Просеков был признан экспертом Высшей аттестационной комиссии в секции инженерных агропромышленных специальностей. С 2014 г. входил в состав диссертационного совета Д 212.089.01 по специальности 05.18.04 – «Технология мясных, молочных и рыбных продуктов», функционировавшего в Кемеровском технологическом институте пищевой промышленности с 1993 по 2018 гг. под председательством Остроумова Льва Александровича. С 2022 г. Александр Юрьевич руководит диссертационным советом 24.2.315.05 при Кемеровском государственном университете, который в настоящее время является единственным в России, присуждающим ученые степени по техническим, биологическим и химическим наукам в профильной отрасли.

В 2016 г. постановлением Президиума Российской академии наук А. Ю. Просекову присвоено звание «Профессор РАН». В 2019 г. общим собранием членов РАН он был избран членом-корреспондентом РАН, а в 2025 г. – академиком РАН.

Александром Юрьевичем накоплен значительный опыт реализации научных проектов, в т. ч. грантов Министерства образования и науки РФ в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009–2013 гг.» (лот «Поддержка научных исследований, проводимых научными группами под руководством докторов наук по научному направлению „Наука о жизни (Живые системы)“»); ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 гг.»; государственного задания; грантов Российского фонда фундаментальных исследований; грантов Российского научного фонда и др.

В разные годы под руководством А. Ю. Просекова выполнялись проекты по следующим тематикам: «Разработка моделей, алгоритмов и технологий безопасных продуктов питания на основе мониторинга факторов формирующих качество» (2007–2008 гг.); «Биохимический и геномный анализ экспрессии гена *pal* с целью получения L-фенилаланин-аммоний-лиазы в связи с созданием продуктов питания для больных фенилкетонурией» (2009–2010 гг.); «Разработка фундаментальных подходов к созданию технологий биоконсервации плодоовощной продукции» (2014–2016 гг.); «Молекулярный дизайн и синтез антимикробных пептидов лактобактерий широкого спектра действия»

(2015 г.); «Получение новой рекомбинантной аминогидролазы *Pseudomonas putida* и характеристика ее биохимических свойств» (2015 г.); «Изучение потенциала психрофильных бактерий и их метаболитов в биологической защите плодоовощной продукции» (2018 г.); «Получение фармацевтических субстанций на основе микроорганизмов – антагонистов, выделенных из природных источников» (2018–2020 гг.); «Разработка научных подходов депонирования диоксида углерода восстановлением фитоценозов на техногенно нарушенных ландшафтах Кузбасса» (2022–2024 гг.).

Академик РАН А. Ю. Просеков является автором более 1000 научных работ, включая 200 публикаций в журналах, индексируемых в международных базах научного цитирования Scopus и Web of Science, из которых 85 статей опубликованы в научных журналах первого и второго квартиля. Показатели публикационной активности: индекс Хирша по данным eLIBRARY.RU – 36, Scopus – 27, Web of Science Core Collection – 23.

Научная школа, созданная Львом Александровичем Остроумовым и руководимая в настоящее время Александром Юрьевичем Просековым, в 2020 г. получила статус и признание в области прикладной биотехнологии, что было подтверждено грантом Президента РФ государственной поддержки научных школ РФ (НШ-2694.2020.4). В рамках этой школы только под руководством Александра Юрьевича защищено 44 кандидатские и 15 докторских диссертаций.

Исследователи этой научной школы активно участвуют в решении актуальных задач в сфере биотехнологий, пищевой промышленности и природопользования. В круг научных интересов ученого и его учеников входят фундаментальные и прикладные аспекты: продуктов питания и технологии их производства, в т. ч. продуктов для функционального и специализированного питания; генетики питания пациентов с различными заболеваниями; биотехнологии пищевых систем (получение биоактивных веществ как растительной, так и животной природы); переработки и хранения сельскохозяйственной продукции; продовольственной безопасности; охотоведения и управления охотничьим хозяйством; вторичной переработки промышленных отходов; экологического мониторинга и рационального природопользования и др.

Области научных интересов

Разработка и совершенствование биотехнологических методов производства продуктов питания, в т. ч. молочных. Молочные продукты – важный компонент здорового питания, источник белков, кальция, витаминов и других нутриентов. В России, несмотря на рост производства, до сих пор сохраняется дефицит сырья, что требует развития внутреннего производства и снижения зависимости от импорта. Современные методики определения белкового состава молока позволяют выявлять фальсификацию и улучшать идентификацию сырья. Однако рост себестоимости производства

продукции часто приводит не только к повышению розничных цен и снижению доступности товара для части населения, но и к вынужденной замене производителями натуральных компонентов молочного сырья на альтернативные ингредиенты с целью снижения издержек. Такая замена представляет собой сложный баланс между экономическими интересами производителей, требованиями потребителей и необходимостью сохранения качества и безопасности продукции. Успех внедрения подобных технологий зависит от разработки инновационных решений, контроля качества и прозрачности информации для потребителей.

Другим направлением снижения себестоимости конечного продукта является глубокая переработка молочного сырья, позволяющая минимизировать отходы и повышать экономическую эффективность производства. Спрос на молочные продукты с добавленной ценностью – обогащенные витаминами, пробиотиками, с пониженным содержанием лактозы и / или адаптированные для специфических групп покупателей – остается стабильно высоким. Отвечая на запросы современного потребителя, исследователи разрабатывают технологии производства безлактозных молочных продуктов, протеиновых добавок, йогуртов с пробиотиками и других функциональных продуктов.

Оздоровление организма через массовое использование кисломолочных продуктов с пробиотическими свойствами считалось и продолжает считаться перспективным направлением в пищевой промышленности, медицине и нутрициологии. Одним из важных путей развития молочной промышленности выступает разработка ферментированных молочных напитков из вторичного молочного сырья. Это позволяет не только рационально использовать производственные отходы, но и создавать продукты с расширенным функциональным потенциалом. Диссертационная работа «Исследование и разработка технологии ферментированных молочных напитков с повышенным содержанием янтарной кислоты» (И. С. Разумникова, 2009 г.), выполненная под руководством Александра Юрьевича, посвящена созданию новых продуктов на основе вторичного молочного сырья с улучшенными функциональными качествами. Янтарная кислота обладает антиоксидантными свойствами, способствует улучшению энергетического обмена в клетках и может положительно влиять на состояние организма. Ее добавление в молочные продукты позволяет повысить их биологическую ценность и функциональную направленность.

Гидролизаты казеина – перспективный источник биологически активных пептидов и аминокислот, которые могут использоваться как полифункциональные добавки, улучшающие свойства пищевых продуктов. Разработка технологий их получения и применения позволяет расширить ассортимент функциональных продуктов, повысить их питательную ценность и стабильность. Диссертационная работа «Исследование и разработка полифункциональных добавок на основе

гидролизатов казеина и практическая реализация технологий пищевых продуктов с их использованием» (М. Г. Курбанова, 2012 г.) затрагивает вопросы создания новых пищевых добавок с расширенными функциональными свойствами и их применения в производстве продуктов питания.

Синбиотические продукты, сочетающие пробиотики, пребиотики и метабиотики и обладающие потенциалом для укрепления иммунитета и улучшения работы желудочно-кишечного тракта изучены в диссертационной работе «Научные и практические аспекты создания новых биотехнологий производства синбиотических молочных продуктов с метабиотиками» (О. В. Козлова, 2020 г.). В ней разработаны инновационные технологии функциональных продуктов питания, способствующие улучшению здоровья населения за счет коррекции микробиоты кишечника.

Технологии мягких сыров из козьего молока (в т. ч. из смеси козьего и коровьего молока), ферментированных молочных напитков, полутвердого сыра и сыра типа камамбер из овечьего молока или его смеси с другим сыром стали объектами исследования в рамках диссертационной работы «Научно-практические аспекты использования козьего и овечьего молока в производстве сыров и цельномолочных продуктов с иммобилизованными культурами бифидобактерий» (Т. В. Вобликова, 2020 г.). В исследовании изучены жирнокислотный и аминокислотный состав, а также молекулярные массы белковых фракций молока коз и овец разных пород, определены биохимические особенности изученных видов молока.

Пептиды, получаемые путем ферментативного гидролиза белков молока (например казеина), обладают антиоксидантными, пребиотическими и иммуномодулирующими свойствами. Использование биопептидов молока позволяет создавать продукты целенаправленного действия (антиоксидантного, иммуномодулирующего, пребиотического), что востребовано на рынке здорового питания. Работа И. С. Милентьевой «Теоретическое обоснование и практическая реализация технологий продуктов питания профилактической направленности на основе биопептидов молока» (2021 г.) посвящена оптимизации параметров ферментативного гидролиза, методам выделения и очистки пептидов, а также условиям их сушки и хранения. Эти исследования легли в основу биотехнологических методик получения биологически активных пептидов из белков молока и создания на их основе функциональных продуктов питания.

Остеоартроз, остеопороз и другие заболевания суставов – достаточно распространенные проблемы не только среди пожилых людей. Гидролизаты коллагена могут способствовать улучшению состояния хрящевой ткани и снижению болевых ощущений. Биологически активные продукты, полученные путем расщепления коллагена (основного белка соединительной ткани) на пептиды и аминокислоты с помощью

ферментативного, кислотного или щелочного гидролиза, находят применение в пищевой, медицинской, косметической и биомедицинской промышленности. Их изучение остается актуальным из-за широкого спектра потенциально полезных свойств и растущего спроса на функциональные продукты. Существующие в России технологии производства гидролизатов коллагена устарели: оборудование и процессы не соответствуют современным требованиям. Диссертационная работа «Биотехнологии, состав и свойства гидролизатов коллагена» (Р. А. Ворошилин, 2025 г.) ориентирована на разработку и оптимизацию технологии получения гидролизатов коллагена, которые обладают функциональными и биоактивными свойствами. Такие гидролизаты могут использоваться для улучшения стабильности и консистенции пищевых продуктов, производства капсул, раневых прокладок, адсорбентов, препаратов для восполнения дефицита коллагена, а также в качестве биологически активных добавок.

Рост населения, ограниченность сельскохозяйственных земель, повышение стоимости животного белка и необходимость снижения экологического воздействия традиционных методов производства пищи приводят к дефициту белка у значительной части мирового населения. В контексте глобальной проблемы дефицита протеинов поиск альтернативных источников белков становится критически важным [1]. При этом животные белки (мясо, субпродукты, рыба, молоко, яйца) – наиболее дорогие, растительные белки (злаки, бобовые, масличные культуры) – более доступная альтернатива, микробиологически синтезированные (из дрожжей и различных бактерий) белки, а также синтетические (искусственные) белки, полученные после синтеза аминокислот, требуют разработки доступных и масштабируемых технологий. Особое внимание исследователи уделяют микроводорослям как перспективному источнику функциональных и биологически активных нутриентов. Их использование в хлебопечении позволяет улучшить органолептические свойства, питательную ценность и стабильность хлеба при хранении, делая его конкурентоспособным по сравнению с обычным пшеничным хлебом [2]. Разработка новых продуктов на основе альтернативных белков (растительных заменителей мяса, добавок для спортивного питания, диетических продуктов) требует дальнейших исследований и масштабирования технологий. Все перечисленные направления получения белковых продуктов, особенно из микроводорослей, прорабатываются участниками научной школы под руководством А. Ю. Просекова.

Специализированные биопродукты питания, в т. ч. молочные, разрабатываются с учетом физиологических потребностей конкретных групп населения, их состояния здоровья, уровня активности и других факторов. Такие продукты направлены на поддержание здоровья, профилактику заболеваний, коррекцию метаболизма и улучшение качества жизни. Разработка отечественных

продуктов питания, способствующих оздоровлению населения и снижению риска заболеваний, соответствует стратегическим задачам страны. Результаты, полученные участниками научной школы под руководством А. Ю. Просекова, заложили базу создания востребованных биопродуктов. При наличии значимой государственной поддержки и необходимого развития инфраструктуры разработанные продукты и технологии их получения могут стать надежной опорой при решении глобальных вызовов, стоящих перед Россией.

Аспекты генетики питания пациентов с различными хроническими заболеваниями. Подходы генетики питания позволяют учесть как генетические особенности человека, влияющие на восприятие определенных продуктов и нутриентов, так и возможность модулировать экспрессию генов, связанных с хроническими заболеваниями. Это позволяет разрабатывать персонализированные диетические рекомендации с учетом индивидуальных генетических рисков и метаболических особенностей [3]. Нутригеномика выявляет биохимические пути взаимодействия генов и пищи, формируя методы терапии и профилактики неинфекционных заболеваний. Нутригенетика исследует индивидуальные генетические вариации, определяющие реакцию организма на те или иные нутриенты. Полиморфизмы генов могут влиять как на усвоение витаминов, минералов, липидов, так и на чувствительность к определенным продуктам [4].

Нутригеномика тесно связывает генетические заболевания с персонализированным питанием при изучении взаимосвязи генов и рациона. Оптимизированный рацион позволяет снизить риск заболеваний и улучшить общее состояние здоровья. Более того, некоторые генетические заболевания требуют строгого ограничения или полного исключения определенных групп продуктов из рациона из-за нарушения метаболизма и аутоиммунных реакций. К таким заболеваниям относятся, например фенилкетонурия, целиакия, непереносимость лактозы и другие наследственные нарушения обмена веществ. При подобных состояниях диетотерапия является одним из основных методов лечения, позволяющим снизить нагрузку на пораженный метаболический путь и контролировать поступление субстратов, которые организм не может адекватно перерабатывать. В некоторых случаях может потребоваться ферментозаместительная терапия или другие методы лечения [5].

Лактазная недостаточность – генетически обусловленное состояние, при котором организм не вырабатывает достаточно фермента лактазы для расщепления лактозы. Это приводит к нежелательным симптомам как у детей, так и у взрослых после употребления молочных продуктов. Диссертационная работа О. В. Козловой «Разработка технологии низколактозного напитка» (2008 г.) посвящена созданию технологии производства молочного напитка с пониженным содержанием лактозы. В работе изучены способы ферментативного гидролиза лактозы до глюкозы и галактозы. Разработанная

технология позволяет производить напитки, доступные для людей с непереносимостью лактозы, с сохранением питательных свойств молочных продуктов.

Гистидинемия – заболевание, при котором нарушен обмен аминокислоты гистидина. Пациенты с подобными наследственными нарушениями метаболизма нуждаются в специализированном питании, исключая эту аминокислоту. В диссертационной работе «Исследование и разработка технологии белкового концентрата на основе гидролизата белков молока» (Г. В. Борисова, 2013 г.) представлены результаты создания специализированного продукта для лечебного питания для больных с указанной патологией.

Дефицит фермента фенилаланингидроксилазы, который участвует в превращении аминокислоты фенилаланина в тирозин, является причиной фенилкетонурии. Мутации в гене, кодирующем этот фермент, приводят к накоплению фенилаланина и его токсичных метаболитов в организме. Традиционные методы терапии данного заболевания основаны на строгой диете с ограничением продуктов, содержащих фенилаланин, что существенно снижает качество жизни пациентов. Из рациона исключаются продукты с высоким содержанием белка (мясо, яйца, бобовые, молочные продукты и др.), а вместо них используются специальные протеиновые смеси, которые содержат необходимые аминокислоты, кроме фенилаланина. В диссертационных работах «Исследование и разработка технологии полуфабриката с пониженным содержанием фенилаланина» (Ю. В. Голубцова, 2008 г.) и «Исследование и разработка технологии молочного белкового эквивалента для специализированных продуктов питания» (О. О. Бабич, 2009 г.), выполненных под руководством Александра Юрьевича, выявлены рациональные условия целенаправленного гидролиза сывороточных белков и казеина энзиматическими системами, состоящими из нескольких ферментов и обеспечивающими максимальное высвобождение фенилаланина из полипептидной цепи. Изучена кинетика процесса биотрансформации фенилаланина с помощью L-фенилаланин-аммоний-лиазы (PAL, КФ 4.3.1.5), что стало основой технологии создания новых видов продуктов с пониженным содержанием фенилаланина для улучшения качества жизни пациентов с фенилкетонурией. Кроме того, использование фермента PAL, катализирующего неокислительное дезаминирование фенилаланина с образованием транс-коричной кислоты и аммиака, открывает новые возможности для создания специализированных продуктов питания, максимально снижающих содержание этой аминокислоты.

Докторская диссертация О. О. Бабич «Теоретическое обоснование и практическая реализация биотехнологий специализированных молочных продуктов с использованием L-фенилаланин-аммоний-лиазы» (2014 г., научный консультант – А. Ю. Просеков) сфокусирована на разработке инновационных подходов к созданию продуктов питания для людей с наслед-

ственным нарушением аминокислотного обмена, при котором в организме накапливается фенилаланин и его токсические метаболиты. В рамках диссертации разработаны методики культивирования штаммов-продуцентов L-PAL: подобран состав питательной среды, изучено влияние параметров периодического культивирования на выход фермента и его активность. Оптимизирована схема очистки, включающая дробное осаждение сульфатом аммония и две хроматографические стадии (металлохелатную и гидрофобную). Исследованы адсорбционный и глутаральдегидный методы иммобилизации фермента на поверхности наночастиц Fe_3O_4 , выбран наиболее эффективный из них: иммобилизованный препарат сохраняет активность в более широком диапазоне pH и температур по сравнению с нативным ферментом. Разработана технология лиофилизации, обеспечивающая максимальное сохранение активности фермента в процессе хранения (до 8 месяцев).

PAL – фермент, который рассматривается как перспективный инструмент для таргетной терапии фенилкетонурии. В отличие от фермента млекопитающих, PAL является мономером и не требует кофакторов. Данный фермент обнаружен у высших растений и дрожжей, где он участвует в защитных механизмах или выполняет катаболическую роль, позволяя использовать L-фенилаланин в качестве источника углерода и азота. PAL катализирует превращение фенилаланина, накапливающегося в крови из-за мутаций в гене фенилаланин-4-гидроксилазы, в транс-коричную кислоту и аммиак. Эксперименты на животных моделях показали, что пероральное введение неабсорбируемого и защищенного PAL снижает уровень фенилаланина в плазме у мышей с гиперфенилаланинемией. Подкожное введение фермента приводило к более существенному снижению уровня фенилаланина в плазме и мозге, однако эффект не сохранялся после повторных инъекций из-за развития иммунного ответа. Для преодоления этой проблемы была разработана пегилированная форма PAL (модификация путем присоединения полиэтиленгликоля). Она обладает лучшей специфической активностью, увеличенным периодом полураспада и сниженной иммуногенностью *in vivo*. Подкожное введение пегилированных молекул мышам с фенилкетонурией давало желаемый метаболический ответ – пролонгированное снижение уровня фенилаланина в крови при значительно ослабленном иммунном ответе. В настоящее время компания BioMarin (США) осуществляет III фазу клинических испытаний [6]. В рамках исследования, проводимого под руководством Александра Юрьевича, разработана технология получения капсулированного PAL [7, 8]. Для создания капсулы использовалась оболочка на основе растельных ингредиентов (агар-агара, каррагинана, карбоксиметилцеллюлозы). Инкапсулирование позволило решить проблемы, связанные с иммуногенностью и протеолитической неустойчивостью фермента. Про-

веденные исследования подтвердили эффективность доставки ферментного препарата в отделы желудочно-кишечного тракта для инактивации фенилаланина.

Использование PAL в качестве заместительной ферментной терапии потенциально может стать альтернативой или дополнением к традиционной диетотерапии, которая требует пожизненного ограничения потребления белка. Это способно улучшить качество жизни пациентов и снизить риск неврологических осложнений. Однако необходимы дальнейшие клинические исследования для оценки безопасности и эффективности метода у людей, определения оптимальной дозировки, способа введения и продолжительности курса лечения. Только при выполнении этих условий у данного препарата появится шанс стать стандартом лечения фенилкетонурии.

Подходы нутригеномики используются при терапии не только врожденных генетических заболеваний, но и приобретенных, в т. ч. обусловленных воздействием окружающей среды и характера питания. Известно, что полиморфизмы генов могут влиять на предрасположенность человека к различным заболеваниям, включая профессиональные. Они определяют индивидуальные различия в реакции организма на вредные производственные факторы, такие как химические вещества, пыль, вибрация, шум и др. Изучение подобных полиморфизмов позволяет выявлять группы риска, разрабатывать персонализированные профилактические меры и совершенствовать диагностику профессиональных заболеваний.

Для Кемеровской области изучение воздействия вредных производственных факторов в шахтах (пыли, химических веществ и канцерогенов), генетических механизмов защиты организма и предрасположенности к развитию рака легких более чем актуально. Совместно с учениками и коллегами Александр Юрьевич изучает аспекты этого влияния. В рамках проведенных исследований были выявлены полиморфизмы генов, кодирующих ферменты репарации ДНК, у шахтеров с раком легких, установлена связь между генетическими маркерами и риском развития онкологических заболеваний, определены особенности работы системы репарации ДНК у работников угольной промышленности, проведен сравнительный анализ генетических показателей здоровых шахтеров и пациентов с раком легких, выявлены специфические изменения в генах, отвечающих за восстановление поврежденной ДНК [9–11]. Исследование полиморфизмов генов открывает новые возможности для профилактики и управления профессиональными заболеваниями, но требует комплексного подхода и дальнейших научных поисков. Результаты подобных исследований создают основу для развития подходов персонализированной медицины в угольной отрасли, а также для разработки новых методов скрининга профессиональных рисков в рамках целевых программ профилактики онкологических заболеваний. При этом важно учитывать, что профессиональные

заболевания часто имеют многофакторный характер, и генетическая предрасположенность – лишь один из факторов риска. Без учета длительности воздействия вредных факторов, их интенсивности, возраста, пола, сопутствующих заболеваний и других параметров невозможно получить адекватную картину существующих механизмов формирования профессиональных заболеваний.

Разработка оптимального рациона для поддержания или улучшения здоровья, профилактики заболеваний и коррекции метаболических нарушений чрезвычайно востребована в современном обществе. Возможность организации персонализированного питания, учитывающего индивидуальные особенности человека (генетику, метаболизм, образ жизни, пищевые предпочтения и состояние здоровья), привлекает внимание как исследователей, так и потребителей. Известно, что нарушения структуры питания (избыток насыщенных жиров и сахара, дефицит витаминов, минералов и других нутриентов) приводят к развитию многих заболеваний, таких как сердечно-сосудистые заболевания, сахарный диабет 2 типа, некоторых форм рака и других патологий. При этом люди по-разному реагируют на одни и те же продукты питания. Эти различия обусловлены сложным взаимодействием индивидуальных факторов, включая генетические особенности, состав микробиома кишечника, физическую активность, а также другие физиологические и средовые характеристики. Прогресс в области геномики, метаболомики, профилирования микробиома и искусственного интеллекта позволяет устанавливать взаимосвязи между питанием и здоровьем и создавать инструменты формирования персонализированных рекомендаций на основе анализа больших объемов данных.

Потребительская геномика – направление, которое предоставляет услуги генетического тестирования непосредственно потребителями без необходимости медицинского сопровождения. Такие тесты позволяют узнать о происхождении, рисках для здоровья, особенностях метаболизма, предрасположенности к определенным заболеваниям и характеристиках, связанных с образом жизни. Результаты используются для принятия решений о питании, физической активности, выборе лекарств и т. д. Работы коллектива молодых исследователей (А. Д. Весниной, Д. Ю. Чекушкиной и др.) под руководством А. Ю. Просекова связаны с изучением влияния генетических факторов на здоровье человека и возможностей его коррекции через питание и образ жизни. Полученные результаты демонстрируют, как понимание генетической предрасположенности может помочь в разработке персонализированных подходов к профилактике и лечению различных заболеваний. В рамках исследования был проведен систематический обзор научных и научно-популярных публикаций, находящихся в открытом доступе и представленных в базах научного цитирования, а также маркетинговых отчетов, начиная с 2012 г. Выделены основные этапы

развития геномики человека, которые стимулировали появление персонализированного питания как примера потребительской геномики. Сформулированы ключевые аспекты нутригенетики и нутригеномики, а также использования данных полногеномных ассоциативных исследований, рассмотрены расчеты полигенного индекса риска, роль эпигенетики и метаболомики в исследованиях микробиома потребителей, проанализированы передовые зарубежные и российские компании в области генетических исследований и персонализации питания [12].

В диссертационной работе А. Д. Весниной «Разработка биотехнологии пищевых ингредиентов из метаболитов hairy roots растений, обладающих антиатеросклеротическим потенциалом» (2023 г., руководитель – А. Ю. Просеков) изучена проблематика атеросклероза и возможной его профилактики с точки зрения питания как фактора, способного влиять на развитие атеросклеротических процессов. В рамках исследования разработана технология получения метаболитов из культуры hairy roots растений с антиатеросклеротическим потенциалом, определены основные биологически активные компоненты, влияющие на развитие атеросклероза, изучено влияние полученных метаболитов на ключевые механизмы развития атеросклеротического процесса, установлены оптимальные условия культивирования растительных клеток для максимального накопления целевых метаболитов, а также разработаны технологические параметры получения пищевых ингредиентов и выявлены эффективные способы стабилизации и сохранения активности целевых компонентов. Использование метаболитов растений, получаемых с помощью технологии hairy roots, открывает новые перспективы для создания средств профилактики сердечно-сосудистых заболеваний. Разработка новых подходов к созданию функциональных пищевых ингредиентов способна влиять на патогенетические механизмы развития атеросклероза [13].

Неалкогольная жировая болезнь печени – серьезное метаболическое заболевание, которое может прогрессировать до цирроза и гепатоцеллюлярной карциномы. Использование биологически активных веществ природных источников, таких как гриб *Hericium coralloides*, открывает возможности профилактики данного заболевания благодаря богатому составу и содержанию биологически активных метаболитов, наиболее изученными из которых являются ловастатин и эрготионеин. Применение чистых метаболитов гриба в пищевых добавках и функциональных продуктах предпочтительнее, т. к. позволяет стандартизировать дозы, целенаправленно воздействовать на конкретные эффекты (иммунитет, нейропротекция, противоопухолевое действие) и снижать необходимое количество продукта. Редкость вида *Hericium coralloides* в природе может быть компенсирована промышленным культивированием его биомассы *in vitro* [14].

Нарушения цикла трикарбоновых кислот (ЦТК, или цикла Кребса) связаны с патогенезом таких хронических заболеваний, как диабет, ожирение, рак, сердечно-сосудистые, нейродегенеративные и остеопоротические заболевания. Генетические и эпигенетические факторы, а также образ жизни и питание оказывают влияние на процессы в ЦТК. Изучение воздействия растительных метаболитов, витаминов и биологически активных добавок приближает к разработке персонализированных подходов с возможностью улучшения существующих профилактических и терапевтических диет. Известны конкретные однонуклеотидные полиморфизмы, являющиеся потенциальными маркерами изменения в экспрессии генов. В частности, полиморфизмы *ACO2* (Arg18Trp, Ser87Leu, Ala252Thr, Leu357Val) связаны с нейродегенеративными заболеваниями, а мутации rs121913499, rs121913500 в генах *IDH1*, *IDH2*, а также rs1270341616 в гене *DLST* – с раком [15]. Активностью ЦТК можно управлять через эпигенетические модификации с помощью таких нутриентов, как ниацин, α -липоевая кислота, янтарная кислота, ресвератрол, куркумин, аргинин, лейцин, кверцетин, урсоловая кислота и альтернол.

Представленные исследования охватывают широкий спектр вопросов, связанных с влиянием генетических факторов на здоровье человека и возможности их коррекции через питание. Эти работы формируют основу для развития персонализированной медицины и создания эффективных стратегий профилактики заболеваний с учетом индивидуальных генетических особенностей человека.

Получение фармацевтических субстанций и биологически активных веществ. Профилактика многих заболеваний (метаболических нарушений, сахарного диабета, сердечно-сосудистых заболеваний и др.) не обходится без препаратов, содержащих БАВ растительного и / или микробного происхождения. Однако большинство стран, включая Россию, зависят от поставок субстанций из Китая, Индии и других государств, что создает определенные риски для стабильности фармацевтического рынка. Александр Юрьевич с коллегами и учениками исследует разработки технологий получения фармацевтических субстанций на основе микроорганизмов-антагонистов, а также биологически активных веществ с использованием культур клеток лекарственных растений.

Диссертационная работа Л. К. Асякиной «Обоснование, практическая реализация технологий и товароведная оценка биоактивных добавок, полученных из клеточных культур растений *in vitro*» (2022 г.) посвящена разработке и внедрению технологий производства биологически активных добавок на основе вторичных метаболитов клеточных культур растений, произрастающих в Сибирском федеральном округе (Россия). В их числе – шлемник байкальский, шлемник андрахновидный, окопник лекарственный, тысячелистник обыкновенный, любка двулистная, лапчатка белая, лимонник

китайский, медуница лекарственная. Все растения обладают доказанными функциональными свойствами. В исследовании экспериментально обоснован компонентный состав и предложена принципиальная схема получения капсулированных форм БАД на основе комплекса вторичных метаболитов, выделенных из экстрактов клеточных культур растений. Разработанные методы могут быть адаптированы для других видов растений и типов клеточных культур. При этом акцент на растениях Сибирского федерального округа открывает возможности для развития локального производства и использования местных ресурсов.

Использование вторичных метаболитов растений, полученных методами культивирования *in vitro*, позволяет создавать продукты целенаправленного действия (антиоксидантного, иммуномодулирующего, гипотензивного и др.), что востребовано на рынке здорового питания. Потенциал вторичных метаболитов растений (фенольных соединений, алкалоидов, изопреноидов и т. д.) обуславливает антиоксидантные, антимикробные, иммуностимулирующие, гипотензивные и другие свойства этих компонентов. Их использование обеспечивает разработку продуктов с целенаправленным профилактическим действием. Диссертационная работа «Теоретическое обоснование и практическая реализация технологий напитков, полученных с использованием вторичных метаболитов растительного сырья, культивируемого *in vitro*» (А. И. Лосева, 2023 г.) ориентирована на разработку инновационных методов получения биологически активных веществ из растительных клеточных культур (левзеи сафлоровидной, женьшеня обыкновенного, элеутерококка колючего, пальчатокоренника пятнистого, диоскореи обыкновенной, сапоникинии растопыренной) и созданию на их основе функциональных напитков. Разработанный метод дает возможность избежать сезонных колебаний, снизить риск контаминации микроорганизмами или повреждения насекомыми, сохранить редкие виды растений, а также повысить производительность за счет автоматизации процессов. На основе полученных экстрактов были созданы: напиток из молочной сыворотки, обогащенный вторичными метаболитами; тонизирующий чайный напиток; основа-концентрат морсов иммуномодулирующего действия; растворимый сухой напиток антиоксидантного действия и гранулированный ягодный кисель профилактической направленности.

Фенольные соединения растений известны своими антиоксидантными, противовоспалительными, противоопухолевыми и другими полезными свойствами, что позволяет использовать их в профилактических целях для снижения риска серьезных заболеваний. *Astragalus danicus* L., произрастающий в Кемеровской области (Россия), является перспективным сырьем для создания фармакологических препаратов. В его надземной части обнаружены флавонолы (изорамнетин-глюкозид, кемпферол-глюкозид), флавоны (апигенин-7-глюкозид) и фенилпропаноиды (хлорогеновая кислота).

Установлено, что содержание флавоноидов в растениях зависит не только от генетических особенностей, но и от гидротермического режима и климатических условий в разных ботанико-географических зонах [16].

В период пандемии COVID-19 возникла потребность в изучении растений, которые могут поддерживать иммунитет и снижать риск осложнений. Растения Северо-Восточной Азии (родиола розовая, сабельник, тараксакум и др.), обладающие антиоксидантными, противовирусными, противовоспалительными и иммуномодулирующими свойствами, отличаются наличием потенциала для применения при профилактике и лечении пневмонии различной этиологии [17]. Остеоартроз – распространенное заболевание соединительной ткани, которое существенно снижает качество жизни. Существует потребность в эффективных методах замедления его прогрессирования, среди которых использование хондропротекторов (хондроитина сульфата, глюкозамина сульфата / гидрохлорида, гиалуроновой кислоты, гликозаминогликанов, экстрактов животного и растительного сырья) [18]. Сахарный диабет – глобальная проблема здравоохранения, требующая разработки более эффективных и безопасных терапевтических подходов. Существующие синтетические препараты имеют ряд побочных эффектов (отеки, лактатацидоз, набор веса, гипогликемия и др.), что делает актуальным поиск альтернативных средств на основе природных метаболитов [19]. Мангиферин как полифенол с потенциальным противодиабетическим действием представляет интерес для разработки новых подходов к лечению диабета [20]. Атеросклероз – одно из самых распространенных сердечно-сосудистых заболеваний. Флавоноиды рассматриваются как перспективные компоненты возможных препаратов для терапии этого заболевания благодаря их антиоксидантным и противовоспалительным свойствам. Кверцетин, полученный из корневых культур *Hedysarum neglectum*, подтвердил наличие антиатеросклеротической активности [21].

Особый интерес представляет возможность использования байкалина, выделенного из корня *Scutellaria baicalensis*, для лечения заболеваний, связанных с *Helicobacter pylori* – бактерией, которая является причиной гастрита, язвенной болезни и рака желудка [22]. Полученные результаты служат основой для комбинированного использования байкалина и пробиотиков в лечении этих заболеваний.

Культивирование клеток и тканей растений *in vitro* – перспективный метод получения биологически активных веществ, особенно для редких и эндемичных видов. Среди методов обработки каллуса, суспензионных и корневых культур *in vitro* наиболее широко на практике применяется метод с использованием агробактерий (*Agrobacterium*), который имеет преимущества перед библистическим методом, т. к. увеличивает долю стабильных трансформаций, позволяет доставлять крупные фрагменты ДНК и не требует специальных баллистических устройств [23]. Многие лекарственные растения,

в т. ч. родиола розовая (*Rhodiola rosea*), рапontiкум сафлоровидный (*Rhaponticum carthamoides*), иссоп лекарственный (*Hyssopus officinalis*), эвкалипт шаровидный (*Eucalyptus globulus*), окопник лекарственный (*Symphytum officinale*), гинкго билоба (*Ginkgo biloba*) и др., обладают потенциальной биологической активностью. В экстрактах высушенной биомассы каллуса, суспензионных клеток и корневых культур этих растений, выращенных исследователями Кемеровского государственного университета, идентифицированы различные биологически активные вещества, которые могут быть использованы для производства фармацевтических препаратов и биологически активных добавок с противоопухолевым, антимикробным, антиоксидантным и другими действиями [24–34].

Исследования демонстрируют важность оптимизации условий культивирования растений и методов экстракции для получения биологически активных соединений, расширяя знания о химическом составе и свойствах растительных экстрактов, что открывает пути для их применения в медицине, сельском хозяйстве и пищевой промышленности.

Биоактивные свойства метаболитов водорослей (полисахаридов, пигментов, жирных кислот, антиоксидантов и других соединений) привлекают внимание исследователей по всему миру благодаря своему потенциалу для использования в медицине, пищевой промышленности, сельском хозяйстве и экологии. Результаты проведенных исследований способствуют развитию биотехнологий, связанных с использованием как микро-, так и макроводорослей, и открывают перспективы для создания новых продуктов с добавленной стоимостью в пищевой, сельскохозяйственной и фармацевтической отраслях. В работе [35] подтверждена высокая энергетическая ценность водорослей и их богатство белками, жирами, углеводами, витаминами, макро- и микроэлементами, выявлены такие биологически активные компоненты, как полиненасыщенные жирные кислоты, миоспориноподобные аминокислоты, полисахариды, каротиноиды, стеролы, лектины, галогенированные соединения, поликетониды, алкалоиды и каррагинаны.

Микроводоросли отличаются высокой метаболической гибкостью, способностью адаптироваться к различным условиям культивирования и быстрым ростом. Учет различных факторов позволяет повысить эффективность извлечения БАВ – белков, липидов, полисахаридов, пигментов, витаминов. Поиску интегрированных технологий культивирования микроводорослей и изоляции из их биомассы различных БАВ с целью повышения рентабельности этих производств посвящен ряд работ [36–44] участников научной школы, руководимой Александром Юрьевичем. Кроме того, возможно использование микроводорослей в сельском хозяйстве. Разработана технология биоудобрений [45] на основе микроводорослей и ассоциированных с ними микроорганизмов для повышения устойчивости сель-

ского хозяйства. Такие удобрения способны улучшать плодородие почвы и снижать зависимость от химических аналогов.

В соответствии с Распоряжением Правительства РФ, утвердившим «Стратегию развития пищевой и перерабатывающей промышленности Российской Федерации на период до 2030 года», перед отраслью поставлена задача разработки современных технологий переработки отечественного сырья для обеспечения населения безопасными и качественными пищевыми продуктами. Большинство биологически активных добавок в настоящее время производится из растительного сырья. Изучению источников животного происхождения с биологической активностью посвящена диссертационная работа Е. А. Вечтомовой «Научно-практические аспекты технологий биофармацевтических органопрепаратов из дериватов животных охотничьего промысла» (2024 г.). В ходе исследования установлено высокое содержание соединений белковой, углеводной и липидной природы в изученных видах дериватов (бобра речного, барсука обыкновенного, бурого медведя, сурка степного). Разработана технология получения биофармацевтических препаратов из сырья, получаемого от животных, являющихся объектами охоты. Доказаны противоопухолевые, фунгицидные и бактериостатические свойства полученных препаратов.

Переработка и хранение сельскохозяйственной продукции. Это ключевые звенья агропромышленного комплекса, от которых зависят продовольственная безопасность, конкурентоспособность отрасли и эффективность использования ресурсов. Эффективное хранение и переработка обеспечивают стабильное снабжение населения продуктами питания, особенно в несезонный (зимне-весенний) период, что особенно важно для стран с сезонным производством и зависимостью от импорта. Однако не все сорта овощей и фруктов подходят для длительной переработки или хранения, а системы предварительной обработки не всегда совершенны. Современные процессы и технологии, такие как озонирование, облучение, воздействие импульсными электромагнитными полями, вакуумная жарка, концентрированное вымораживание и др., а также биоразлагаемые упаковки и съедобные покрытия; модифицированные газовые среды для продления срока хранения плодоовощной продукции и методы глубокой переработки сырья (включая вовлечение в оборот вторичных ресурсов) позволяют решить многие существующие проблемы сельскохозяйственной отрасли и пищевой промышленности.

В рамках диссертационных работ «Исследование и разработка технологии получения антимикробного покрытия для пищевых упаковок» (Т. А. Розаленок, 2016 г.) и «Теоретическое обоснование и практическая реализация технологий получения антимикробных пленок на основе полисахаридов и их производных для пищевой промышленности» (Л. С. Дышлюк, 2021 г.),

выполненных под руководством А. Ю. Просекова, разработаны антимикробные материалы для пищевой промышленности, увеличивающие сроки хранения и обеспечивающие безопасность продукции. В научном труде Т. А. Розаленок была создана и апробирована технология получения антимикробного покрытия (кластерное серебро, биоцидные композиции) для пищевых упаковок из бумаги и картона, предназначенных для мучных кондитерских изделий, в работе Л. С. Дышлюк – технология антимикробных биоразлагаемых пленок на основе полисахаридов (агар-агар, каррагинан, гидроксипропилметилцеллюлоза) с добавлением наночастиц серебра, меди и оксида цинка. Представленные технологии могут быть адаптированы для различных видов пищевой продукции, а результаты исследований внесли свой вклад в развитие экологически безопасных упаковочных материалов и их внедрение в промышленное производство.

Скоропортящиеся продукты, в т. ч. плоды, фрукты и овощи, требуют особых условий хранения с момента поступления в продажу до покупки потребителями. Основная причина потерь при хранении – микробиальная порча. Традиционные методы сохранения (химическая обработка, охлаждение, озонирование и т. д.) не всегда экологичны и могут снижать естественный иммунитет продукции. Разработка биоконсервантов на основе полезных микроорганизмов – перспективное направление, позволяющее увеличить сроки хранения, сохранить качество продукции и снизить экологическую нагрузку. Такие биопрепараты могут стать альтернативой химическим консервантам, обеспечивая безопасность для здоровья человека и окружающей среды. Разработке биоконсервантов посвящены работы М. И. Зиминой «Исследование и разработка технологии получения биоконсерванта для увеличения сроков хранения плодов и овощей» (2016 г.) и С. А. Сухих «Теоретическое обоснование и практическая реализация технологий получения биоконсервантов для пищевой промышленности» (2021 г.). В ходе исследований из природных материалов и кисломолочных продуктов выделено 36 чистых культур молочнокислых бактерий и других микроорганизмов. Их вторичные метаболиты обладали антимикробной и фунгицидной активностью против патогенных и условно-патогенных микроорганизмов. Создана технология получения и применения биоконсервантов на основе выбранных микроорганизмов. Подтверждена возможность увеличения срока годности с помощью разработанных биоконсервантов: твердых сыров – в 1,8 раза, вареных колбас в натуральной оболочке – в 2,1 раза, овощей и фруктов – почти в 2,0 раза. Бактериоцины представляют интерес как альтернатива антибиотикам в пищевой промышленности. Инкапсуляция позволит целенаправленно доставлять их в нужные участки продукта для подавления патогенных микроорганизмов и увеличения срока хранения [46].

Использование микроорганизмов с антагонистической активностью против фитопатогенов в составе

биоудобрений может улучшить качество почвы и снизить потребность в химических консервантах для сельскохозяйственной продукции [45]. Применение таких биоудобрений с добавлением микроводорослей также способствует повышению качества почвы, увеличению устойчивости растений к болезням и уменьшению потребности в химических консервантах. Микробная ферментация – метод улучшения питательной ценности сырья и снижения содержания антинутриентов, что важно для продления срока хранения и повышения качества продуктов. Смешанные культуры пробиотических микроорганизмов (*Bacillus subtilis*, *Aspergillus niger*, *Saccharomyces cerevisiae*, *Lactiplantibacillus plantarum*) способствовали увеличению содержания белка в соевой муке за счет быстрого роста собственной биомассы. Разработанная технология может быть применена для производства функциональных продуктов питания с улучшенными питательными свойствами и длительным сроком хранения [47].

Предварительная ультрафиолетовая обработка – метод, потенциально способный улучшить антиоксидантные свойства овощей и продлить срок хранения за счет замедления порчи. Помимо антимикробного эффекта, УФ-облучение в А-диапазоне овощей (огурцы, болгарский перец, кабачки) приводит к увеличению общего содержания фенольных соединений и флавоноидов [48]. Предложенная методика УФ-обработки плодов может быть использована как нехимическая технология продления срока хранения овощей и усиления их антиоксидантных свойств.

В период с 2010 по 2016 гг. ученики Александра Юрьевича изучали аспекты переработки вторичного сырья агропромышленных производств для снижения отходов и создания продуктов с добавленной стоимостью. Кровь сельскохозяйственных животных, являясь ценным сырьем с высоким содержанием белка, может применяться для получения функциональных продуктов, кормовых добавок и питательных сред для микроорганизмов. Кератинсодержащие отходы (пухоперовое сырье) с помощью биопрепаратов на основе микроорганизмов с кератиназной активностью преобразуются в ценные кормовые добавки. Результаты этих исследований представлены в успешно защищенных диссертационных работах: «Разработка технологии переработки кератинсодержащего сырья с использованием *Streptomyces ornatus* S-1220» (А. Ю. Полетаев, 2011 г.); «Исследование и разработка технологии сублимационной сушки крови сельскохозяйственных животных с использованием жидкого азота в качестве агента предварительного замораживания» (А. В. Гринюк, 2014 г.); «Разработка технологии получения биопрепарата для переработки кератинсодержащих отходов» (А. И. Линник, 2015 г.); «Научно-практические аспекты разработки и реализации комплексной технологии переработки крови сельскохозяйственных животных» (О. В. Кригер, 2016 г.). Итоги данных исследований вносят вклад в повыше-

ние эффективности использования вторичного сырья и развитие циркулярной экономики.

Продовольственная безопасность. В современных условиях нестабильности добиться глобальной продовольственной безопасности практически невозможно. Вызовы современного мирового порядка – финансовые кризисы, локальные конфликты, геополитические и экономические санкции – сопровождаются значительным числом нуждающихся в питании. Рост числа которых в меньшей степени связан с ростом численности населения Земли и нехваткой производимых продовольственных ресурсов [49]. Более того, стабильность и благополучие для большинства людей не приносят прибыли той части управляющей элиты, которая зарабатывает на нестабильности. В периоды относительного спокойствия кризисы и военные конфликты (такие как пандемия COVID-19, военные конфликты в Сирии, на Украине, Палестине, Иране и др., потоки беженцев из Азии и Африки в Европу и многие другие, свидетелями которых мы являемся) создаются искусственно для обеспечения стабильного дохода. В современном укладе мирового правопорядка достичь глобальной продовольственной безопасности невозможно – нет заинтересованных в этом сторон, за исключением групп, находящихся в состоянии продовольственной нестабильности. Однако на локальном уровне ситуация кардинально противоположная, особенно в развивающихся странах, заинтересованных в дальнейшем экономическом росте [50].

Во многих случаях голода на локальных территориях или в одиночных государствах можно избежать за счет грамотного перераспределения производимых ресурсов без необходимости интенсификации сельскохозяйственного производства и пищевой промышленности [51]. При оказании гуманитарной помощи редко поднимается вопрос о сбалансированности питания и генетической предрасположенности к определенному рациону питания отдельных этнических групп [51], упор, как правило, делается на калорийные продукты с высоким содержанием углеводов и / или жиров. Реализация подходов, предложенных в исследовании, позволит повысить уровень продовольственной безопасности, обеспечить устойчивое развитие сельского хозяйства и создать условия для стабильного снабжения населения качественными продуктами питания. Это особенно важно в ситуации растущей конкуренции на мировом продовольственном рынке и необходимости обеспечения продовольственной независимости государств.

Экологический мониторинг и рациональное природопользование. В современных условиях ключевыми инструментами сохранения природных ресурсов Кузбасса являются экологический мониторинг – комплексная система наблюдений за состоянием окружающей среды, которая позволяет своевременно выявлять негативные изменения и принимать необходимые меры по их устранению. В 2022 г. А. Ю. Просеков

защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора биологических наук по теме «Принципы интенсификации функционирования охотничьего хозяйства сибирского федерального округа российской федерации» в ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт охотничьего хозяйства и звероводства им. Б. М. Житкова» (Киров, Россия). На момент проведения исследования в России на федеральном и региональном уровнях отсутствовала единая система государственного контроля и управления ресурсами животного мира. Это приводило к повсеместному неэффективному использованию охотничьих ресурсов. В Сибирском федеральном округе, где сосредоточены обширные охотничьи угодья, эта проблема была особенно острой. Несмотря на значительный потенциал охотничьего хозяйства, существовала угроза снижения биоразнообразия охотничьих животных из-за антропогенного воздействия, изменения среды обитания и других факторов. Исследование было сфокусировано на Сибирском федеральном округе, что позволило сформировать общие подходы к управлению с учетом специфики региона (климатических условий, типов ландшафтов и видов охотничьих животных) [52–58].

Министерство природных ресурсов и экологии РФ разрабатывало стратегию цифровой трансформации отрасли экологии и природопользования, в ходе реализации которой возникла необходимость адаптации цифровых технологий к управлению охотничьими ресурсами. В своей работе Александр Юрьевич, стремясь найти баланс между экономическим использованием охотничьих ресурсов и сохранением биологического разнообразия для выполнения принципов устойчивого развития, предложил использовать современные цифровые методы учета охотничьих животных, мониторинга их популяций и управления охотничьими угодьями. Эти методы включают применение беспилотных летательных аппаратов, геоинформационных систем и других технологий, повышающих точность и эффективность управления. Работа заложила теоретические предпосылки и методические принципы интенсификации охотничьего хозяйства с использованием цифровых сервисов, что открыло пути для дальнейших научных исследований в этой области.

Традиционные методы контроля численности охотничьих животных требуют модернизации, что особенно важно для сохранения биоразнообразия и устойчивого развития охотничьего хозяйства. Систематический сбор информации о результатах охоты, состоянии популяций животных и угодий позволяет отслеживать изменения в экосистемах и своевременно реагировать на негативные тенденции. Разработанные инновационные методики дистанционного мониторинга охотничьих ресурсов с использованием беспилотных летательных аппаратов подтвердили свою эффективность по сравнению с существующими методами управления численностью охотничьих ресурсов [59, 60]. Однако результативное регулирование взаимодей-

ствия охотников и землепользователей невозможно без решения правовых вопросов данной проблемы. В России существует потребность в механизме согласования деятельности землепользователей с интересами охотничьего хозяйства. Четкое правовое регулирование взаимодействия охотников и землепользователей позволяет эффективнее контролировать нагрузку на экосистемы. Так, в рамках охотхозяйственных соглашений могут устанавливаться лимиты на добычу животных, что способствует сохранению популяций и биоразнообразия. Это особенно важно в регионах с хрупкими экосистемами или в зонах, где охотничья деятельность может пересекаться с сельскохозяйственным и лесным хозяйством [60].

Угледобывающая промышленность вносит внушительный вклад в углеродный след. Известно, что парниковые газы, в первую очередь метан, образуются при добыче угля, однако в шахтах с остановленной угледобычей выделяется метана в три раза больше [61]. Центр угледобычи в России – Кузбасс (Кузбасский угольный бассейн), на него приходится около 60 % всей добычи угля стране¹ [62].

Правительство Российской Федерации ставит перед собой задачу к 2060 г. обеспечить, с одной стороны, устойчивый рост экономики, с другой – углеродную нейтральность страны. Кузбасс – регион ресурсного типа, поэтому любой закон об углеродном регулировании является очень актуальным для этой части Сибири. Законы о контроле над выбросами углерода направлены на соблюдение экологических стандартов, установленных Парижским соглашением. При этом для Кузбасса углеродный контроль означает производственные ограничения и низкую конкурентоспособность. Регион не демонстрирует ориентации на структурную и технологическую модернизацию и не готов к переходу на низкоуглеродную экономику, особенно в условиях мирового экономического кризиса угледобывающей отрасли [63]. Углеродные полигоны и углеродные фермы могут стать перспективным инструментом развития сектора землепользования, изменения землепользования и лесного хозяйства, поскольку они способны повысить конкурентоспособность местных компаний на углеродном рынке [63, 64].

В рамках проекта РНФ «Разработка научных подходов депонирования диоксида углерода восстановлением фитоценозов на техногенно нарушенных ландшафтах Кузбасса» в 2022–2024 гг. разрабатывались научные подходы не только на фиторемедиацию территорий, нарушенных угольными предприятиями Региона, но и на снижение их углеродного следа, что достигалось подбором растений с высоким секвестрационным потенциалом в сочетании с микробиологическими препаратами, улучшающими качество восстанавливаемых почв [65–68].

¹ Угольная промышленность России. URL: https://ru.ruwiki.ru/wiki/Угольная_промышленность_России (дата обращения 24.03.2026).

Угольная промышленность оказывает негативное воздействие на всю окружающую экосистему, при этом состояние водных объектов также заслуживает пристального внимания. Существующие системы очистки сточных вод угледобывающих предприятий и шахт требуют модернизации, поскольку их текущие показатели не соответствуют современным требованиям, а реки и водоемы прилегающих территорий подвергаются существенной экологической нагрузке. В эти же годы проведена оценка эффективности работы существующих очистных сооружений, изучено влияние очистных мероприятий на качество воды малых рек, создана база данных по составу и концентрации загрязняющих веществ, а также исследованы характеристики различных фильтрующих материалов, используемых для очистки вод от взвешенных частиц. Разработанные рекомендации по совершенствованию систем очистки сточных вод и методики контроля качества очистных мероприятий позволили повысить эффективность очистки и снизить негативное влияние угольной промышленности на водные экосистемы Кузбасса [69–73].

Предложенные технологии могут быть масштабированы на другие предприятия и техногенно нарушенные территории, а полученные данные позволяют оптимизировать процессы рекультивации и создавать эффективные механизмы снижения углеродного следа промышленных предприятий не только Кузбасса. Выявленные результаты реализованного проекта могут стать основой разработки стратегий восстановления нарушенных экосистем на базе низкоуглеродного формирования промышленности, что особенно актуально в контексте государственной задачи достижения углеродной нейтральности к 2060 г.

Заключение

Профессиональный путь академика Российской академии наук Александра Юрьевича Просекова – это вдохновляющий пример многогранного таланта, трудолюбия и преданности делу. Юбилей руководителя научной школы имени Льва Александровича Остроумова является достойным поводом признания заслуг Александра Юрьевича в выбранной научной стратегии и создании квалифицированного научного коллектива, который формирует новое поколение профессионалов, способных отвечать на вызовы времени. Он заложил прочные теоретические основы, открывшие новые перспективы для дальнейших научных изыс-

каний – каждое направление его деятельности отличается глубиной исследований и практической значимостью. Александр Юрьевич более 10 лет успешно руководит Кемеровским государственным университетом, динамично развивающимся вузом, где классическая высшая школа обретает новые грани благодаря передовым технологиям. Вуз растет и обновляется: появляются новые институты, научные лаборатории, модернизируется инфраструктура. Александр Юрьевич Просеков – это не просто академик, а человек, чье видение и энергия продолжают двигать вперед науку и образование. Он видит на шаг вперед, стратегически мыслит и умеет вдохновлять окружающих на достижение амбициозных целей.

Критерии авторства

С. А. Иванова – концептуализация, методология, подготовка первоначального черновика. О. О. Бабич, О. В. Кригер, Ю. В. Голубцова, Т. В. Вобликова – формальный анализ, рецензирование и редактирование статьи.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Раскрытие использования ИИ

Алиса AI (ООО «Яндекс», 1.0, Россия) использовалась для поиска литературы, подготовки переводов, перефразирования или редактирования текста.

Contribution

S.A. Ivanova developed the research concept and methodology and was responsible for the original draft. O.O. Babich, O.V. Kriger, Yu.V. Golubtsova, and T.V. Voblikova provided the formal analysis, review, and proofreading.

Conflict of interest

The authors declared no potential conflict of interest regarding the research, authorship, and/or publication of this article.

Declaration of generative AI

The authors used Alice AI (Yandex LLC, Russia) for literature search, translation assistance, and linguistic editing. The final output was strictly reviewed and validated by the authors.

Список литературы / References

1. Dolganyuk V, Sukhikh S, Kalashnikova O, Ivanova S, Kashirskikh E, et al. Food proteins: Potential resources. Sustainability. 2023;15:5863. <https://doi.org/10.3390/su15075863>
2. Sukhikh S, Ivanova S, Dolganyuk V, Pilevinova I, Prosekov A, et al. Evaluation of the prospects for the use of microalgae in functional bread production. Applied Sciences. 2022;12:12563. <https://doi.org/10.3390/app122412563>
3. Vesnina A, Prosekov A, Kozlova O, Atuchin V. Genes and eating preferences, their roles in personalized nutrition. Genes. 2020;11(4):357. <https://doi.org/10.3390/genes110403574>

4. Ponasenko A, Sinitsky M, Minina V, Vesnina A, Khutornaya M, *et al.* Immune response and lipid metabolism gene polymorphisms are associated with the risk of obesity in middle-aged and elderly patients. *Journal of Personalized Medicine*. 2022;12:238. <https://doi.org/10.3390/jpm12020238>
5. Babich OO, Pokrovsky VS, Anisimova NY, Sokolov NN, Prosekov AY. Recombinant L-phenylalanine ammonia-lyase from *Rhodospiridium toruloides* as a potential anticancer agent. *Biotechnology and Applied Biochemistry*. 2013;60(3): 316–322. <https://doi.org/10.1002/bab.1089>
6. Mahan KC, Gandhi MA, Anand S. Pegvaliase: A novel treatment option for adults with phenylketonuria. *Current Medical Research and Opinion*. 2019;35(4):647–651. <https://doi.org/10.1080/03007995.2018.1528215>
7. Babich O, Dyshlyuk L, Prosekov A, Noskova S, Ivina O, *et al.* Study of the potential of the capsule shell based on natural polysaccharides in targeted delivery of the L-phenylalanine ammonia-lyase enzyme preparation. *Pharmaceuticals*. 2020;13(4):63. <https://doi.org/10.3390/ph13040063>
8. Babich O, Dyshlyuk L, Noskova S, Prosekov A, Ivanova S, *et al.* The effectiveness of plant hydrocolloids at maintaining the quality characteristics of the encapsulated form of L-phenylalanine-ammonia-lyase. *Heliyon*. 2020;6(1):e03096. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e03096>
9. Соболева О. А., Минина В. И., Торгунакова А. В., Титов Р. А., Яковлева А. А. и др. Обеспеченность витамином D работников угольных шахт в зависимости от носительства полиморфных вариантов генов *VDR* и *GC*. 2024. Т. 93. № 4. С. 74–83. [Soboleva OA, Minina VI, Torgunakova AV, Titov RA, Yakovleva AA, *et al.* Vitamin D status in connection with *VDR* and *GC* genes polymorphism in coal mining workers. *Problems of Nutrition*. 2024;93(4):74–83. (In Russ.)] <https://doi.org/10.33029/0042-8833-2024-93-4-74-83>
10. Тимофеева А. А., Минин А. В., Баканова М. Л., Захарова Я. А., Торгунакова А. В. и др. Полиморфизм генов ферментов репарации ДНК у работников угольных шахт больных раком легкого. Журнал сибирского федерального университета. Серия: Биология. 2024. Т. 17. № 1. С. 33–34. [Timofeeva AA, Minin AV, Bakanova ML, Zakharova YaS, Torgunakova AV, *et al.* Polymorphism of genes encoding DNA repair enzymes in coal mine workers with lung cancer. *Journal of Siberian Federal University – Biology*. 2024;17(1):33–44. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/SPGETQ>
11. Яковлева А. А., Минина В. И., Соболева О. А., Борисова О. И., Булатова О. В. и др. Влияние полиморфизма гена *ApoE* на развитие ожирения и биохимические показатели крови работников угольных шахт. Медицина Труда. 2025. Т. 104. № 3. С. 318–322. [Yakovleva AA, Minina VI, Soboleva OA, Borisova OI, Bulatova OV, *et al.* Influence of *ApoE* gene polymorphism on development of obesity and blood biochemical parameters in coal mine workers. *Gigiena and Sanitariya*. 2025;104(3):318–322. (In Russ.)] <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2025-104-3-318-322>
12. Просеков А. Ю., Веснина А. Д., Любимова Н. А., Чекушкина Д. Ю., Михайлова Е. С. Потребительская геномика: роль в персонализации питания. Техника и технология пищевых производств. 2025. Т. 55. № 2. С. 400–415. [Prosekov AY, Vesnina AD, Lyubimova NA, Chekushkina DY, Mikhailova ES. Consumer genomics in personalized nutrition. *Food Processing: Techniques and Technology*. 2025;55(2):400–415. (In Russ.)] <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2025-2-2582>
13. Vesnina A, Prosekov A, Atuchin V, Minina V, Ponasenko A. Tackling atherosclerosis via selected nutrition. *International Journal of Molecular Sciences*. 2022;23(15):8233. <https://doi.org/10.3390/ijms23158233>
14. Chekushkina D, Kozlova O, Vechtomova E, Prosekov A. Dietary use of *Hericium coralloides* for NAFLD prevention. *Nutrients*. 2026;18(3):418. <https://doi.org/10.3390/nu18030418>
15. Vesnina A, Kozlova O, Ivanova S, Prosekov A. Citric acid cycle genes and nutrigenetics. *International Journal of Molecular Sciences*. 2026;27(5):2360. <https://doi.org/10.3390/ijms27052360>
16. Babich O, Prosekov A, Zaushintsena A, Sukhikh A, Dyshlyuk L, *et al.* Identification and quantification of phenolic compounds of Western Siberia *Astragalus danicus* in different regions. *Heliyon*. 2019;5(8):e02245. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02245>
17. Babich O, Sukhikh S, Prosekov A, Asyakina L, Ivanova S. Medicinal plants to strengthen immunity during a Pandemic. *Pharmaceuticals*. 2020;13:313. <https://doi.org/10.3390/ph13100313>
18. Sukhikh S, Babich O, Prosekov A, Patyukov N, Ivanova S. Future of chondroprotectors in the treatment of degenerative processes of connective tissue. *Pharmaceuticals*. 2020;13:220. <https://doi.org/10.3390/ph13090220>
19. Sukhikh S, Babich O, Prosekov A, Kalashnikova O, Noskova S, *et al.* Antidiabetic properties of plant secondary metabolites. *Metabolites*. 2023;13:513. <https://doi.org/10.3390/metabo13040513>
20. Vesnina A, Le V, Ivanova S, Prosekov A. Antidiabetic potential of mangiferin: An *in silico* and *in vivo* approach. *Pharmaceutics*. 2025;17:1262. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics17101262>
21. Vesnina A, Milentyeva I, Minina V, Kozlova O, Asyakina L. Evaluation of the *in vivo* anti-atherosclerotic activity of quercetin isolated from the hairy roots of *Hedysarum neglectum* Ledeb. *Life*. 2023;13:1706. <https://doi.org/10.3390/life13081706>
22. Dmitrieva A, Kozlova O, Atuchin V, Milentjeva I, Vesnina A, *et al.* Study of the effect of baicalin from *Scutellaria baicalensis* on the gastrointestinal tract normoflora and *Helicobacter pylori*. *International Journal of Molecular Sciences*. 2023;24:11906. <https://doi.org/10.3390/ijms241511906>
23. Babich O, Sukhikh S, Pungin A, Ivanova S, Asyakina L, *et al.* Modern trends in the *in vitro* production and use of callus, suspension cells and root cultures of medicinal plants. *Molecules*. 2020;25:5805. <https://doi.org/10.3390/molecules25245805>

24. Asyakina L, Sukhikh S, Ivanova S, Prosekov A, Ulrikh E, et al. Determination of the qualitative composition of biologically-active substances of extracts of *in vitro* callus, cell suspension, and root cultures of the medicinal plant *Rhodiola rosea*. Biomolecules. 2021;11:365. <https://doi.org/10.3390/biom11030365>
25. Asyakina L, Ivanova S, Prosekov A, Dyshlyuk L, Chupakhin E, et al. Determination of the qualitative composition of biologically active substances of extracts of *in vitro* callus, cell suspension, and root cultures of the medicinal plant *Rhaponticum carthamoides*. Applied Sciences. 2021;11:2555. <https://doi.org/10.3390/app11062555>
26. Babich O, Sukhikh S, Pungin A, Astahova L, Chupakhin E, et al. Evaluation of the conditions for the cultivation of callus cultures of *Hyssopus officinalis* regarding the yield of polyphenolic compounds. Plants. 2021;10:915. <https://doi.org/10.3390/plants10050915>
27. Sukhikh S, Ivanova S, Babich O, Larina V, Krol O, et al. Antimicrobial screening and fungicidal properties of *Eucalyptus globulus* ultrasonic extracts. Plants. 2022;11:1441. <https://doi.org/10.3390/plants11111441>
28. Le V, Dolganyuk V, Sukhikh A, Babich O, Ivanova S, et al. Phytochemical analysis of *Symphytum officinale* root culture extract. Applied Sciences. 2021;11:4478. <https://doi.org/10.3390/app11104478>
29. Le V, Sukhikh A, Larichev T, Ivanova S, Prosekov A, et al. Isolation of the main biologically active substances and phytochemical analysis of *Ginkgo biloba* callus culture extracts. Molecules. 2023;28:1560. <https://doi.org/10.3390/molecules28041560>
30. Milentyeva IS, Fedorova AM, Larichev TA, Altshuler OG. Biologically active compounds in *Scutellaria baicalensis* L. callus extract: Phytochemical analysis and isolation. Foods and Raw Materials. 2023;11(1):172–186. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2023-1-564>
31. Vesnina AD, Milentyeva IS, Le VM, Fedorova AM, Altshuler OG, et al. Quercetin isolated from *Hedysarum neglectum* Ledeb. as a preventer of metabolic diseases. Foods and Raw Materials. 2025;13(1):192–201. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2025-1-633>
32. Velichkovich NS, Dunchenko NI, Stepanova AA, Kozlova OV, Faskhutdinova ER, et al. The phytochemical composition of Kuzbass medicinal plants. Foods and Raw Materials. 2025;13(2):219–232. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2025-2-649>
33. Chekushkina DYu, Fedorova AM, Kovalenko SV, Milentyeva IS, Altshuler OG, et al. Anti-metabolic syndrome effect of trans-cinnamic acid. Food Processing: Techniques and Technology. 2025;55(1):136–147. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2025-1-2563>
34. Fedorova AM, Shevel AA, Kovalenko SV, Miller ES, Loseva AI, et al. Geroprotective potential of *Thymus vulgaris* L. callus culture and its metabolites. Foods and Raw Materials. 2026;14(2):443–460. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2026-2-688>
35. Babich O, Sukhikh S, Larina V, Kalashnikova O, Kashirskikh E, et al. Algae: Study of edible and biologically active fractions, their properties and applications. Plants. 2022;11:780. <https://doi.org/10.3390/plants11060780>
36. Dolganyuk V, Belova D, Babich O, Prosekov A, Ivanova S, et al. Microalgae: A promising source of valuable bioproducts. Biomolecules. 2020;10:1153. <https://doi.org/10.3390/biom10081153>
37. Dolganyuk V, Andreeva A, Budenkova E, Sukhikh S, Babich O, et al. Study of morphological features and determination of the fatty acid composition of the microalgae lipid complex. Biomolecules. 2020;10(11):1571. <https://doi.org/10.3390/biom10111571>
38. Andreeva A, Budenkova E, Babich O, Sukhikh S, Ulrikh E, et al. Production, purification, and study of the amino acid composition of microalgae proteins. Molecules. 2021;26:2767. <https://doi.org/10.3390/molecules26092767>
39. Sukhikh S, Prosekov A, Ivanova S, Maslennikov P, Andreeva A, et al. Identification of metabolites with antibacterial activities by analyzing the FTIR spectra of microalgae. Life. 2022;12:1395. <https://doi.org/10.3390/life12091395>
40. Dolganyuk V, Andreeva A, Sukhikh S, Kashirskikh E, Prosekov A, et al. Study of the physicochemical and biological properties of the lipid complex of marine microalgae isolated from the coastal areas of the eastern water area of the Baltic sea. Molecules. 2022;27:5871. <https://doi.org/10.3390/molecules27185871>
41. Babich O, Budenkova E, Kashirskikh E, Dolganyuk V, Ivanova S, et al. Study of the polysaccharide production by the microalga *Vischeria punctata* in relation to cultivation conditions. Life. 2022;12:1614. <https://doi.org/10.3390/life12101614>
42. Долганюк В. Ф., Сухих С. А., Каширских Е. В., Ульрих Е. В., Кремлева О. Е. и др. Скрининг и характеристика антиоксидантных свойств психрофильных микроводорослей и цианобактерий Балтийского моря. Техника и технология пищевых производств. 2024. Т. 54. № 2. С. 212–221. [Dolganyuk VF, Sukhikh SA, Kashirskikh EV, Ulrikh EV, Kremleva OE, Babich OO. Screening and profiling the antioxidant properties of psychrophilic microalgae and cyanobacteria from the Baltic sea. Food Processing: Techniques and Technology. 2024;54(2):212–221. (In Russ.)] <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-2-2501>
43. Чиждова А. А., Бабич О. О., Каширских Е. В., Буденкова Е. А., Дышлюк Л. С. Микроводоросли *Scenedesmus* как источник пигментов и других биологически активных метаболитов: перспективы и проблемы применения. Техника и технология пищевых производств. 2025. Т. 55. № 3. С. 468–484. [Chizhova AA, Babich OO, Kashirskikh EV, Budenkova EA, Dyshlyuk LS. Microalgae *Scenedesmus* as a source of pigments and other biologically active metabolites: Application prospects and problems. Food Processing: Techniques and Technology. 2025;55(3):468–484. (In Russ.)] <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2025-3-2585>

44. Dolganyuk VF, Kashirskikh EV, Sukhikh SA, Kremleva OE, Ulrikh EV, *et al.* Effect of cultivation conditions on polysaccharide synthesis by *Skeletonema pseudocostatum*. *Foods and Raw Materials*. 2026;14(2): 276–284. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2026-2-671>
45. Babich O, Sukhikh S, Dyshlyuk L, Shishko O, Milentyeva I, *et al.* Evaluation of biocompatibility and antagonistic properties of microorganisms isolated from natural sources for obtaining biofertilizers using microalgae hydrolysate. *Microorganisms*. 2021;9:1667. <https://doi.org/10.3390/microorganisms9081667>
46. Zimina M, Babich O, Prosekov A, Sukhikh S, Ivanova S, *et al.* Overview of global trends in classification, methods of preparation and application of bacteriocins. *Antibiotics*. 2020;9:553. <https://doi.org/10.3390/antibiotics9090553>
47. Sukhikh S, Kalashnikova O, Ivanova S, Prosekov A, Krol O, *et al.* Evaluating the influence of microbial fermentation on the nutritional value of soybean meal. *Fermentation*. 2022;8:458. <https://doi.org/10.3390/fermentation8090458>
48. Ivanova S, Prosekov A. Study of the antioxidant potential of UV-treated vegetables. *Nutraceuticals*. 2022;2(4):289–299. <https://doi.org/10.3390/nutraceuticals2040022>
49. Prosekov AYU, Ivanova SA. Food security: The challenge of the present. *Geoforum*. 2018;91:73–77. <https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2018.02.030>
50. Prosekov AYU. Food security and globalization. *Foods and Raw Materials*. 2025;14(2):247–251. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2026-2-679>
51. Prosekov AYU, Ivanova SA. Nutritional features of indigenous peoples of Siberia and North America: Are we relatives? *Journal of Ethnic Foods*. 2018;5(3):155–160. <https://doi.org/10.1016/j.jef.2018.07.002>
52. Просеков А. Ю., Каган Е. С., Мешечкин В. В. Прогнозная модель динамики численности лося в Кемеровской области. *Вестник охотоведения*. 2020. Т. 17. № 2. С. 100–106. [Prosekov AYU, Kagan ES, Meshechkin VV. Modeling elk population in the Kemerovo Region. *Bulletin of Hunting*. 2020;17(2):100–106. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/ZMSDXU>
53. Просеков А. Ю. Характеристика и ключевые ограничения традиционных методов учета охотничьих животных и цифровые технологии для решения существующих проблем (обзор). *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*. 2020. Т. 21. № 4. С. 341–354. [Prosekov AYU. Characteristics and key limitations of traditional methods for accounting hunting animals and digital technologies for solving the existing problems (review). *Agricultural Science Euro-North-East*. 2020;21(4):341–354. (In Russ.)] <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2020.21.4.341-354>
54. Просеков А. Ю. Внедрение цифровых технологий в методы учета охотничьих животных. *Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование*. 2020. Т. 3. № 3. С. 268–274. [Prosekov AYU. Introduction of digital technologies in methods of accounting for hunting animals. *Proceedings of Lower Volga Agro-University Complex: Science and Higher Education*. 2020;3(3):268–274. (In Russ.)] <https://doi.org/10.32786/2071-9485-2020-03-28>
55. Просеков А. Ю., Бойко Е. В. Охотустройство Кемеровской области – Кузбасса. *Научная жизнь*. 2021. Т. 16. № 1. С. 127–138. [Prosekov AYU, Boyko EV. Hunting management of the Kemerovo region – Kuzbass. *Scientific Life*. 2021;16(1):127–138. (In Russ.)] <https://doi.org/10.35679/1991-9476-2021-16-1-127-138>
56. Prosekov A, Kuznetsov A, Rada A, Ivanova S. Methods for monitoring large terrestrial animals in the wild. *Forests*. 2020;11(8):808. <https://doi.org/10.3390/f11080808>
57. Ivanova S, Prosekov A, Kaledin A. Is ecotourism an opportunity for large wild animals to thrive? *Sustainability*. 2022;14:2718. <https://doi.org/10.3390/su14052718>
58. Ivanova S, Prosekov A, Kaledin A. A survey on monitoring of wild animals during fires using drones. *Fire*. 2022;5:60. <https://doi.org/10.3390/fire5030060>
59. Ivanova S, Prosekov A. Hunting resource management by population size control by remote sensing using an unmanned aerial vehicle. *Nature Environment and Pollution Technology*. 2024;23(1):391–399. <https://doi.org/10.46488/NEPT.2024.v23i01.033>
60. Lisina N, Ushakova A, Ivanova S, Prosekov A. Regulation of interaction between hunters and land users: A comparative legal study. *Law*. 2023;12:14. <https://doi.org/10.3390/laws12010014>
61. Ivanova S, Vesnina A, Fotina N, Prosekov A. An overview of carbon footprint of coal mining to curtail greenhouse gas emissions. *Sustainability*. 2022;14:15135. <https://doi.org/10.3390/su142215135>
62. Ivanova S, Zhidkova E, Prosekov A. Limiting the carbon footprint of an enterprise: Calculation methods and solutions. *Qubahan Academic Journal*. 2023;3(4):51–61. <https://doi.org/10.48161/qaj.v3n4a158>
63. Ivanova S, Vesnina A, Fotina N, Prosekov A. Approaches to reducing the carbon footprint of mines within the framework of planned biorecultivation of technogenically disturbed lands. *International Journal of Chemical and Biochemical Sciences*. 2024;25(19):629–639. <https://doi.org/10.62877/72-IJCBS-24-25-19-72>
64. Ivanova S, Vesnina A, Fotina N, Prosekov A. Phytoremediation of technogenically disturbed soils of coal mines. *International Journal of Chemical and Biochemical Sciences*. 2024;25(19):610–621. <https://doi.org/10.62877/70-IJCBS-24-25-19-70>
65. Ivanova S, Vesnina A, Fotina N, Prosekov A. Technogenically disturbed lands of coal mines: Restoration methods. *Nature Environment and Pollution Technology*. 2024;23(4):2447–2452. <https://doi.org/10.46488/NEPT.2024.v23i01.033>

66. Ivanova S, Vesnina A, Fotina N, Prosekov A. Influence of coal mining activities on soil's agrochemical and biochemical properties. *Qubahan Academic Journal*. 2023;3(4):387–399. <https://doi.org/10.58429/qaj.v3n4a22961>
67. Atuchin VV, Asyakina LK, Serazetdinova YR, Frolova AS, Velichkovich NS, *et al.* Microorganisms for bioremediation of soils contaminated with heavy metals. *Microorganisms*. 2023;11(4):864. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11040864>
68. Asyakina LK, Vorob'eva EE, Proskuryakova LA, Zharko MYu. Evaluating extremophilic microorganisms in industrial regions. *Foods and Raw Materials*. 2023;11(1):162–171. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2023-1-556>
69. Ivanova LA, Prosekov AYu, Ivanov PP, Mikhaylova ES, Timoshchuk IV, *et al.* Assessment of the efficiency of wastewater treatment from coal enterprises for suspended solids using various filtering materials. *Mining Science and Technology Russian Federation*. 2024;9(3):263–270. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2024-03-227>
70. Просеков А. Ю., Тимошук И. В., Горелкина А. К., Михайлова Е. С., Голубева Н. С. и др. Сравнительная оценка содержания загрязняющих примесей в карьерных сточных водах угольных предприятий Кузбасса. *Уголь*. 2023. Т. 8. № 4. С. 69–73. [Prosekov AYu, Timoshchuk IV, Gorelkina AK, Mikhailova ES, Golubeva NS, *et al.* Comparative assessment of the content of pollutants in quarry wastewater of Kuzbass coal enterprises. *Coal*. 2023;8(4):69–73. (In Russ.)] <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2023-4-69-73>
71. Иванова Л. А., Голубева Н. С., Тимошук И. В., Горелкина А. К., Просеков А. Ю. и др. Оценка эффективности очистки сточных вод угледобывающего предприятия и ее влияние на загрязнение малых рек. *Экология и промышленность России*. 2023. Т. 27. № 1. С. 60–65. [Ivanova LA, Golubeva NS, Timoshchuk IV, Gorelkina AK, Prosekov AYu, *et al.* Evaluation of the efficiency of wastewater treatment of a coal mining enterprise and its impact on the pollution of small rivers. *Ecology and Industry of Russia*. 2023;27(1):60–65. (In Russ.)] <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2023-1-60-65>
72. Иванова Л. А., Тимошук И. В., Горелкина А. К., Михайлова Е. С., Голубева Н. С. и др. Выбор сорбента для элиминации ионов железа из сточных и природных вод. *Техника и технология пищевых производств*. 2024. Т. 54. № 2. С. 398–411. [Ivanova LA, Timoshchuk IV, Gorelkina AK, Mikhaylova ES, Golubeva NS, Neverov EN, *et al.* Removing excess iron from sewage and natural waters: Selecting optimal sorbent. *Food Processing: Techniques and Technology*. 2024;54(2):398–411. (In Russ.)] <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-2-2516>
73. Неверов Е. Н., Тимошук И. В., Горелкина А. К., Иванова Л. А., Михайлова Е. С. и др. Деконтаминация ионов марганца из сточных вод и природных источников. *Техника и технология пищевых производств*. 2025. Т. 55. № 3. С. 634–647. [Neverov EN, Timoshchuk IV, Gorelkina AK, Ivanova LA, Mikhaylova ES, *et al.* Removal of manganese ions from natural and wastewater. *Food Processing: Techniques and Technology*. 2025;55(3):634–647. (In Russ.)] <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2025-3-2598>

Дополнительная информация об авторах / Additional information about the authors

Иванова Светлана Анатольевна / Svetlana A. Ivanova ORCID 0000-0002-1252-9572; eLIBRARY SPIN 1246-6109
Бабич Ольга Олеговна / Olga O. Babich ORCID 0000-0002-4921-8997; eLIBRARY SPIN 2744-9496
Кригер Ольга Владимировна / Olga V. Kriger ORCID 0000-0002-1489-0716; eLIBRARY SPIN 4981-1381
Голубцова Юлия Владимировна / Yulia V. Golubtsova ORCID 0000-0002-2958-4172; eLIBRARY SPIN 6354-4329
Вобликова Татьяна Владимировна / Tatiana V. Voblikova ORCID 0000-0001-6306-8414; eLIBRARY SPIN 7866-9721

<https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-2-2635>
<https://elibrary.ru/YHETCE>

Оригинальная статья
<https://fptt.ru>

Гидролизат сывороточных белков, обогащенный йодом и цинком, как средство коррекции стресс-индуцированных йододефицитных состояний у мышей линии C57Bl/6N



И. А. Барковская*, Е. И. Муклецова, А. А. Агарков,
А. Е. Рябова, А. Н. Петров

Всероссийский научно-исследовательский институт молочной промышленности, Москва, Россия

Поступила в редакцию: 19.09.2025

Принята после рецензирования: 21.10.2025

Принята к публикации: 25.11.2025

*e-mail: i_barkovskaya@vniimi.org

© И. А. Барковская, Е. И. Муклецова, А. А. Агарков,
А. Е. Рябова, А. Н. Петров, 2026



Аннотация.

Йододефицит признан Всемирной организацией здравоохранения одной из наиболее значимых алиментарных проблем современности, охватывающей более половины населения. Его последствия дополнительно усугубляются хроническим стрессом, который в совокупности с дефицитом микроэлемента приводит к нарушению эндокринно-метаболического баланса и снижению адаптивного потенциала организма. Цель исследования – оценить эффективность функционального действия обогащенного гидролизата сывороточных белков в части нивелирования последствий хронического стресса у лабораторных животных.

В исследовании использованы экспериментальный образец – гидролизат сывороточных белков, обогащенный йодом и цинком, и контрольный образец – необогащенный гидролизат сывороточных белков. Определяли острую токсичность (однократное внутрибрюшинное введение дозы 5000 мг/кг) и острое раздражающее действие (нанесение на кожу и фиксация реакции в течение 72 ч). Эффективность действия продукта оценивали на мышах линии C57Bl/6N в условиях модели хронического стресса с использованием поведенческих тестов («Открытое поле» и «О-лабиринт»), анализа динамики изменения массы тела животных и гормонального профиля (кортизол, ТТГ, Т4 и Т3), а также измерения относительной массы внутренних органов.

Установлено, что продукт не оказывает острого токсического и раздражающего действия ($LD_{50} > 5000$ мг/кг) и классифицирован как малоопасный (IV класс опасности). В условиях хронического стресса гидролизат с органическими формами йода и цинка снижал уровень тревожности: медианная дистанция в тесте «Открытое поле» – 14,35 м против 11,30 м у стресс-контроля; наибольшее время в открытых зонах «О-лабиринта» – 36,31 с. Продукт способствовал восстановлению массы тела и частичной нормализации гормонального фона (поддержание активного Т3 на уровне, сопоставимом с интактным контролем). Относительная масса мозга животных, получавших обогащенный гидролизат, не снижалась, в отличие от стресс-контроля.

Гидролизат сывороточных белков с органическими формами йода и цинка может рассматриваться как безопасный и перспективный белковый ингредиент для профилактики стресс-индуцированных йододефицитных состояний и поддержания нейроэндокринной стабильности. Результаты исследования позволяют продолжить клинические испытания обогащенного гидролизата и расширить выпуск пищевой продукции.

Ключевые слова. Обогащенный гидролизат, йододефицит, стресс-индуцированные гормональные нарушения, доклинические исследования

Финансирование. Работа выполнена за счет средств гранта Российского научного фонда № 24-26-00220, <https://rscf.ru/project/24-26-00220/>

Для цитирования: Барковская И. А., Муклецова Е. И., Агарков А. А., Рябова А. Е., Петров А. Н. Гидролизат сывороточных белков, обогащенный йодом и цинком, как средство коррекции стресс-индуцированных йододефицитных состояний у мышей линии C57Bl/6N. Техника и технология пищевых производств. 2026. Т. 56. № 2. С. 221–233. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-2-2635>

Whey Protein Hydrolysate Fortified with Iodine and Zinc against Stress-Induced Iodine Deficiency in C57Bl/6N Mice



Irina A. Barkovskaya^{*}, Evgenia I. Mukletsova,
Alexandr A. Agarkov, Anastasia E. Ryabova, Andrey N. Petrov

All-Russian Dairy Research Institute^{ROR}, Moscow, Russia

Received: 19.09.2025
Revised: 21.10.2025
Accepted: 25.11.2025

^{*}e-mail: i_barkovskaya@vniimi.org
© I.A. Barkovskaya, E.I. Mukletsova, A.A. Agarkov, A.E. Ryabova,
A.N. Petrov, 2026



Abstract.

Insufficient iodine intake is recognized by the World Health Organization as one of the most significant nutritional problems of our time. More than half of the global population suffers from iodine deficiency, which is often aggravated by chronic stress. This combination leads to endocrine, nervous, cognitive, and immune disorders. This article describes the functional efficacy of a fortified whey protein hydrolysate in mitigating the consequences of chronic stress in laboratory animals.

The research featured an experimental sample of whey protein hydrolysate fortified with iodine and zinc. Unfortified protein hydrolysate served as the control. The study determined acute toxicity (via a single intragastric dose of 5,000 mg/kg) and acute irritant effects (via skin application with reaction monitoring for 72 h). Efficacy was evaluated in C57Bl/6N laboratory mice under chronic stress conditions using Open Field and O-Maze behavioral tests. Other parameters included body weight changes, hormonal profiles (cortisol, TSH, T4, T3), and the relative weight of internal organs.

The fortified sample exerted no acute toxic or irritant effects ($LD_{50} > 5,000$ mg/kg) and was classified as low-hazard (Hazard Class IV). The experimental hydrolysate containing organic iodine and zinc significantly reduced chronic anxiety. The median distance in the Open Field test reached 14.35 m (compared to 11.30 m in the control); the time spent in the open zones of the O-Maze increased to 36.31 s. Furthermore, the product contributed to body weight recovery and partial hormonal normalization, maintaining active T3 at a level comparable to the intact control. Unlike the stress-control group, the relative brain weight of the experimental animals did not decrease.

Whey protein hydrolysate with organic iodine and zinc proved to be a safe food ingredient, capable of preventing stress-induced iodine deficiency and maintaining neuroendocrine stability. Further clinical trials will follow to validate its use in functional foods.

Keywords. Fortified hydrolysate, iodine deficiency, stress-induced hormonal disorders, preclinical studies

Funding. The research was supported by the Russian Science Foundation, no. 24-26-00220, <https://rscf.ru/project/24-26-00220/>

For citation: Barkovskaya IA, Mukletsova EI, Agarkov AA, Ryabova AE, Petrov AN. Whey Protein Hydrolysate Fortified with Iodine and Zinc against Stress-Induced Iodine Deficiency in C57Bl/6N Mice. Food Processing: Techniques and Technology. 2026;56(2):221–233. (In Russ.) <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-2-2635>

Введение

Йододефицит остается одной из наиболее серьезных проблем алиментарного спектра в области общественного здравоохранения [1–3]. Данные клинического мониторинга здоровья мирового населения в 2014–2024 гг. выявили, что низкое потребление йода отмечается у 5 млрд человек на планете (более 60 % от общего населения) [4]. Кроме того, по результатам анализа 2025 г., наиболее выраженный дефицит йода в питании наблюдается у женщин детородного возраста, что негативно отражается на их метаболических и репродуктивных функциях [5]. Подобные статистические данные оказывают негативное влияние на современную демографическую ситуацию в мире: глобальный суммарный коэффициент рож-

даемости за период 1950–2021 гг. снизился более чем в 2 раза – с 4,84 до 2,23 [6, 7]. Таким образом, проблема дефицита йода рассматривается не только как медицинская, но и как социально-экономическая, поскольку остается ведущей предотвратимой причиной нарушения регуляции экспрессии половых гормонов, адекватного функционирования сердечно-сосудистой системы, когнитивных функций и др. [2, 8, 9]. Одним из основных факторов, поддерживающих подобную клиническую картину, является глобальное изменение структуры питания современного человека: снижение потребления традиционных источников йода, рост вегетарианских и веганских диет, а также неэффективность существующих алиментарных средств профилактики йододефицитных состояний [2].

Помимо диеты, несбалансированной по микронутриентному составу, йододефицитные состояния усугубляются хроническим стрессом – неотъемлемой частью жизни современного человека, особенно в крупных городах [10, 11]. Исследования показывают, что современная городская среда (загрязненный воздух, повышенный уровень шума и т. д.) напрямую влияет на повышение автономной реактивности, приводит к нарушению циркадного ритма, эмоциональному выгоранию и снижению качества сна – ключевых факторов, поддерживающих состояние хронического стресса [10]. Повышенный уровень кортизола подавляет секрецию тиреотропного гормона (ТТГ) и нарушает конверсию тироксина (Т4) в активный трийодтиронин (Т3), вызывая функциональный гипотиреоз (даже при достаточном потреблении йода) [12]. Подобные механизмы опосредованной регуляции подробно изучены в обзоре K. Petrowski & G. Kahaly, в котором показано влияние глюкокортикоидов (в т. ч. кортизола) на всю гипоталамо-гипофизарно-тиреоидную ось [12]. Истощение нервной системы и йододефицит формируют в организме патологический синергизм, ухудшающий работу щитовидной железы и снижающий адаптивный потенциал организма. В связи с этим актуальны исследования, направленные на создание алиментарных средств для нивелирования нарушений функционирования организма посредством комплексного эндокринно-метаболического действия.

В данной области учеными создано значительное количество функциональных ингредиентов и обогащенных ими продуктов [2, 3, 13, 14]. Большое внимание в трудах исследователей уделено разработке технологий молочных продуктов специализированной [15–17], функциональной [13, 18, 19] и профилактической направленности [20], в т. ч. содержащих йод [2, 3, 20, 21]. Так, в 2014–2020 гг. создан ряд технологий производства молока [22, 23], кефира [24] и творога [25], обогащенных йодированным казеином. Помимо добавки «Йодказеин» в отрасли исследовали возможность применения йодированных препаратов растительного и животного происхождения для введения в состав мясных [26], молочных [21, 27, 28], хлебобулочных [29] и других изделий. Однако ввиду современного состояния проблемы йододефицитных состояний, возникает необходимость поиска новых нутрицевтических подходов к их нивелированию. Гидролизат сывороточ-

ных белков с органическими формами цинка и йода, ранее полученный во ФГАНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт молочной промышленности» (ВНИМИ, Москва, Россия) [1, 30], представляет собой перспективный продукт для профилактики йододефицита и поддержания организма в условиях хронического стресса. Данная гипотеза обоснована содержанием органической формы цинка в белковом ингредиенте, участвующей в метаболизме йода в организме [31], и в функционировании центральной нервной системы. Цинк участвует в синтезе тиреотропин-высвобождающего гормона (ТРГ) и ТТГ, определяет активность дейодиназы, отвечающей за работу тиреоидных рецепторов, обеспечивая эффективное преобразование Т4 в активный Т3 [32, 33]. Кроме того, G. Akkurt *et al.* [34] отмечают повышение синтеза тиреоидных гормонов у крыс при употреблении гидролизата сывороточных белков, связывая данный эффект с высоким содержанием аминокислот в сывороточных белках. Цель исследования – оценить эффективность функционального действия обогащенного гидролизата сывороточных белков в части нивелирования последствий хронического стресса у лабораторных животных.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования являлся сухой гидролизат сывороточных белков, обогащенный йодом и цинком, выработанный по технологии согласно [1, 30]. В качестве контроля использовали необогащенный гидролизат сывороточных белков, полученный по аналогичной технологии. Образцы получали на оборудовании Центра коллективного пользования Всероссийского научно-исследовательского института молочной промышленности (ЦКП ВНИМИ). Физико-химические характеристики обогащенного и необогащенного гидролизатов сывороточных белков представлены в таблице 1. Массовую долю белка определяли по ГОСТ 34454-2018 методом Кьельдаля на анализаторе Kjeltec-2400 Auto Analyzer (Foss Electric, Дания); массовую долю влаги – по ГОСТ Р 54668-2011 с использованием сушильного шкафа ES-4610 (ЗАО НПО «ЭКРОС», Россия); массовую долю цинка – по ГОСТ 34633-2020 на приборе Agilent 5110 ICP-OES (Agilent Technologies, Малайзия); массовую долю йода – по ГОСТ 26185-84 (с модификацией ФГАНУ «ВНИМИ») на спектрофотометре СФ-2000 (ООО «ОКБ СПЕКТР», Россия).

Таблица 1. Физико-химические характеристики гидролизата сывороточных белков

Table 1. Physico-chemical characteristics of whey protein hydrolysate

Показатель	Гидролизат	
	Обогащенный	Необогащенный
Массовая доля белка, %, не менее	78,0	
Массовая доля влаги, %, не более	5,0	
Массовая доля цинка, мг/100 г гидролизата, не менее	131,0	–
Массовая доля йода, мг/100 г гидролизата, не менее	1,8	–

Оценку острой токсичности обогащенного гидролизата сывороточных белков проводили согласно ГОСТ 32644 с введением предельной дозы образца – 5000 мг/кг. Исследования выполняли на клинически здоровых, сексуально наивных животных: трех самках мышей линии BALB/c, полученных путем разведения маточного поголовья (ООО «СМК СТЕЗАР», Россия). Использовали случайным образом отобранных мышей, прошедших адаптацию в течение 7 суток, возрастом 10 недель и массой $14,8 \pm 0,7$ г на начало эксперимента.

Изучение острого раздражающего действия обогащенного гидролизата сывороточных белков осуществляли по ГОСТ 32436 на клинически здоровых, сексуально наивных животных: четырех самцах морских свинок конвенциональной категории (ООО «Кролинфо», Россия), прошедших адаптацию в течение 7 суток, возрастом 6 месяцев, массой 500–600 г на начало эксперимента.

Изучение эффективности действия обогащенного гидролизата сывороточных белков выполняли на клинически здоровых, сексуально наивных животных: сорока мышах-самцах линии C57Bl/6N, полученных путем разведения маточного поголовья (ООО «Кролинфо», Россия), отобранных случайным образом, индивидуально промаркированных и прошедших адаптацию на протяжении 7 суток, возрастом 15 недель и массой $25,0 \pm 5,0$ г на начало эксперимента. Распределение животных на экспериментальные группы представлено в таблице 2.

На 0 и 28 сутки проводили поведенческие тестирования – «О-лабиринт» и «Открытое поле». На 29 сутки животных выводили из эксперимента, оценивали состояние внутренних органов, определяли содержание кортизола, ТТГ, Т4 и Т3, согласно инструкции производителя (наборы для иммуноферментного анализа – Cloud-Clone, США).

Все эксперименты с участием лабораторных животных выполняли в Экспериментальной клинике – лаборатории биологически активных веществ животного происхождения ФГБНУ «ФНЦ пищевых систем им. В. М. Горбатова» РАН (Москва, Россия) в соответствии с требованиями законодательства Российской Федерации, положениями Европейской конвенции

о защите позвоночных животных, используемых для экспериментальных и других научных целей, а также положениями Guide for the Care and Use of Laboratory Animals (Washington D.C., 2011) и другими нормами международного права, регулирующими содержание и использование лабораторных (экспериментальных) животных.

Статистический анализ данных осуществляли с использованием программ STATISTICA 10 (StatSoft Inc., США), IBM SPSS Statistics 10 (IBM, США) и GraphPad Prism 8.2.1 (GraphPad Software, США). Результаты поведенческих тестов представлены в виде диаграмм «ящик с усами». Динамика массы тела животных в течение эксперимента визуализирована в виде линейных графиков с указанием медианы и стандартного отклонения. Уровни гормонов представлены в виде столбчатых диаграмм (медиана, стандартное отклонение). Статистическую оценку различий проводили с применением непараметрического критерия Краскела-Уоллиса с поправкой Бонферрони. Уровень значимости принят равным $p < 0,05$.

Результаты и их обсуждение

Исследование острой токсичности и острого раздражающего действия обогащенного гидролизата сывороточных белков показало, что введение экспериментального образца в предельно допустимой дозе (5000 мг/кг внутривенно) не сопровождалось летальными исходами или выраженными клиническими проявлениями токсичности у мышей. В течение периода наблюдений не зарегистрировано нарушений двигательной активности, дыхательной и сердечной деятельности, реакции на внешние раздражители. Масса животных оставалась стабильной на протяжении исследования (колебания не превышали ± 6 % от исходной массы). Аутопсия и макроскопический анализ внутренних органов животных не выявили патологических изменений, относительная масса органов соответствовала физиологическим значениям. Согласно критериям GHS (Globally Harmonized System of Classification and Labelling of Chemicals) и ГОСТ 12.1.007, исследуемый обогащенный гидролизат сывороточных белков классифицируется как малоопасный (IV класс

Таблица 2. Распределение экспериментальных групп животных для оценки эффективности действия обогащенного гидролизата сывороточных белков

Table 2. Distribution of experimental groups of animals to evaluate the effectiveness of enriched whey protein hydrolysate

Группа	Количество животных в группе	Условия содержания
1	10	Контрольная группа животных, питающаяся стандартным комбикормом
2	10	Группа животных с хроническим спонтанным стрессом, питающаяся обогащенным гидролизатом сывороточных белков (экспериментальный образец)
3	10	Группа животных с хроническим спонтанным стрессом, питающаяся необогащенным гидролизатом сывороточных белков (контрольный образец)
4	6	Группа животных с хроническим спонтанным стрессом, питающаяся стандартным комбикормом

опасности, $LD_{50} > 5000$ мг/кг). Полученные результаты согласуются с литературными данными, указывающими на высокую безопасность белковых гидролизатов как источников биоактивных пептидов и функциональных ингредиентов [35, 36]. F. Hussein *et al.* [36] доказали безопасность гидролизата концентрата сывороточных белков при оценке острой (однократная доза 2500 мг/кг) и подострой (повторное введение доз 200, 400 и 800 мг/кг) пероральной токсичности, установив среднюю смертельную дозу введения (LD_{50}) гидролизата > 2500 мг/кг.

Оценка острого раздражающего действия обогащенного гидролизата также не выявила неблагоприятных реакций у исследуемых животных. Однократная аппликация на кожу морских свинок не сопровождалась изменением окраски, отеками, воспалительных реакций или повреждения целостности кожного покрова в течение 72 ч наблюдений. Литературные данные подтверждают релевантность полученных результатов, подчеркивая биосовместимость и отсутствие раздражающего и / или коррозионного потенциала пептидов при пероральном введении или дерматологическом тестировании [37–39]. S. Peighambardoust *et al.* отмечают, что гидролизаты пищевых белков не оказывают ингибирующего действия на жизнеспособные клетки, не провоцируют нежелательных иммунных реакций и имеют статус «общепризнанно безопасных» (GRAS – Generally Recognized as Safe), согласно классификации FDA [37]. L. Liu *et al.* дополнительно подчеркивают отсутствие мутагенного, тератогенного действия, подтвержденного экспериментально *in vivo* [38].

При исследовании влияния действия обогащенного гидролизата сывороточных белков на течение стресс-опосредованных йододефицитных состояний и гормонального баланса на животных проводили моделирование стресса в течение 7 суток в соответствии со схемой, представленной на рисунке 1.

Воздействие хронического стресса у экспериментальных животных сопровождалось развитием выраженной очаговой алопеции у стрессированных групп (2–4). Детектированные эффекты согласуются с резуль-

татами дерматологических исследований [40, 41], описывающих проявление стресс-индуцированных состояний. Подобная клиническая картина обусловлена системной нейроэндокринной реакцией на раздражающие факторы, сопровождающейся избыточной выработкой кортикотропин-рилизинг гормона, кортикостерона, активных форм кислорода и нейрогенных факторов воспаления кожи, которые могут препятствовать росту волос [40]. Употребление как обогащенного, так и необогащенного гидролизата сывороточных белков не оказало явного положительного / негативного действия на нивелирование нарушений регенерации волосяного покрова.

Поведенческие тесты «Открытое поле» и «О-лабиринт», проведенные для оценки уровня тревожности и двигательной активности мышей до начала исследования и по его завершении, выявили четкие различия между группами (рис. 2 и 3).

По результатам теста «Открытое поле» животные, получавшие обогащенный гидролизат, демонстрировали наибольшую двигательную активность: медианная пройденная дистанция составила 14,35 м (рис. 2а), зафиксировано минимальное количество эпизодов замиранья и высокий коэффициент подвижности (до 98 %, рис. 2б), что указывает на снижение уровня тревожности и сохранение исследовательской активности в условиях хронического стресса. Вероятно, подобные эффекты ассоциированы с употреблением органических форм цинка и йода. Этот вывод подтверждается ранее полученными результатами исследований психоэмоционального состояния и нормального функционирования организма лабораторных животных в условиях хронического стресса и дефицита микронутриентов (в т. ч. цинка) [42, 43]. К. Lee *et al.* [42] доказали корреляцию недостатка цинка в организме с нарушением социального поведения и повышенной тревожностью у мышей. Показано, что дефекты поведения нормализуются при употреблении достаточного количества микроэлемента. Это может быть обосновано физиологической ролью цинка в организме: цинк является ко-фактором синтетических белков и модулятором нейротрансмиссии,



Рисунок 1. Моделирование хронического спонтанного стресса у экспериментальных животных

Figure 1. Simulating chronic spontaneous stress in experimental animals

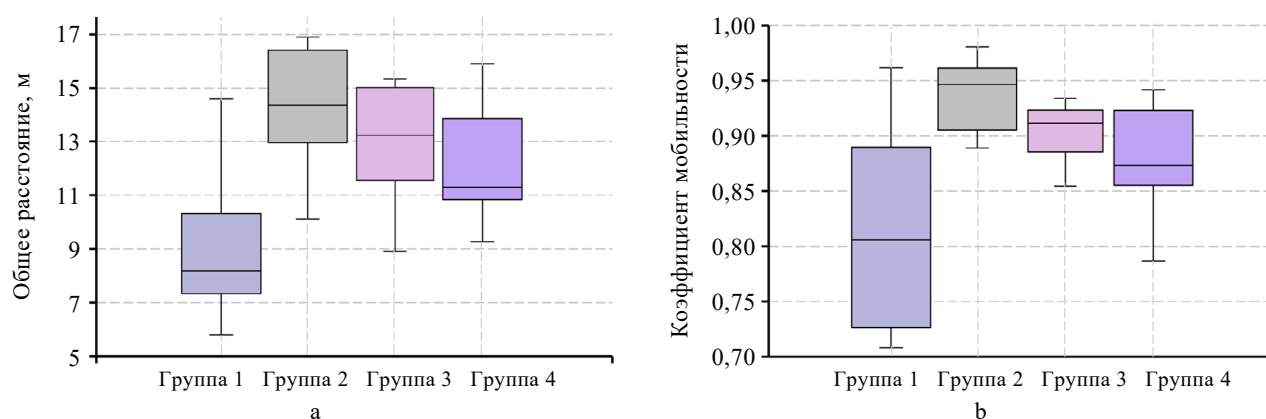


Рисунок 2. Результаты поведенческого теста «Открытое поле» на 28 сутки эксперимента: а – двигательная активность животных; б – подвижность животных

Figure 2. Open Field Test (Day 28): a – motor activity; b – mobility

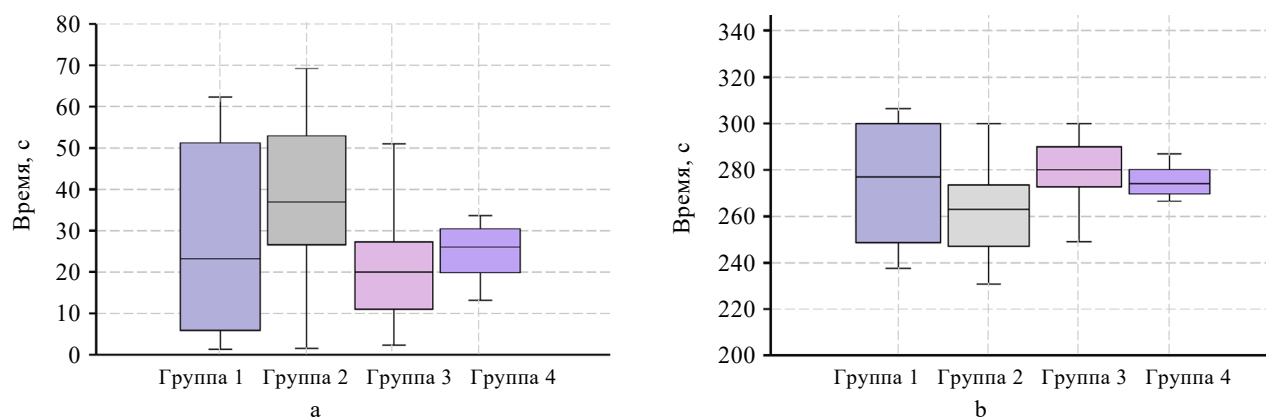


Рисунок 3. Результаты поведенческого теста «О-лабиринт» на 28 сутки эксперимента: а – время пребывания животных в открытой зоне; б – время пребывания животных в зоне укрытия

Figure 3. O-Maze Test (Day 28): a – time spent in the open; b – time spent in the shelter

способствуя улучшению психоэмоционального состояния и нивелированию когнитивных нарушений посредством нормализации активности AMPAR- и NMDAR-рецепторов и экспрессии SHANK3 в миндалевидном теле (базальной и латеральной части) [42]. В открытых источниках не найдено исследований непосредственного влияния йода на поведенческие паттерны животных, однако в работе [44] обнаружена устойчивая взаимосвязь между тиреоидными нарушениями и тревожным поведением: нормализация гормонального фона, связанного с йододефицитом, приводит к улучшению состояния животных. Таким образом, полученные показатели теста «Открытое поле» позволяют говорить о более стабильном эффекте от применения обогащенного гидролизата сывороточных белков в модуляции стресс-индуцированных изменений поведения. Результаты оценки состояния мышей методикой «О-лабиринт» дополняют данные теста «Открытое поле»: животные, получавшие обогащенный гидролизат (группа 2), показали наибольшее среднее время

пребывания в открытой зоне (36,31 с) и наименьшую долю полностью «тревожных» особей (только 10 % животных демонстрировали полное избегание открытой зоны), что подтверждает анксиолитический потенциал продукта.

Анализ изменений массы тела животных выявил сложную разнонаправленную динамику под влиянием хронического стресса и применения гидролизатов. К 16 суткам картина динамики массы тела существенно изменилась: в группе 2 показатель снизился до 22,6 г (–11,0 %); в группе 3 – до 22,7 г (–13,4 %); в группах 1 и 4 сохранилась относительная стабильность. Несмотря на фазу выраженного снижения массы в середине эксперимента у стрессированных групп, получавших гидролизаты (группы 2 и 3, рис. 4), к окончанию исследования мыши практически полностью восстановили исходные показатели: группа 2 восстановилась до 25,1 г (–1,2 % от исходной), а группа 3 не только вернулась к исходным показателям, но и превысила их, достигнув 25,8 г (+1,5 %).

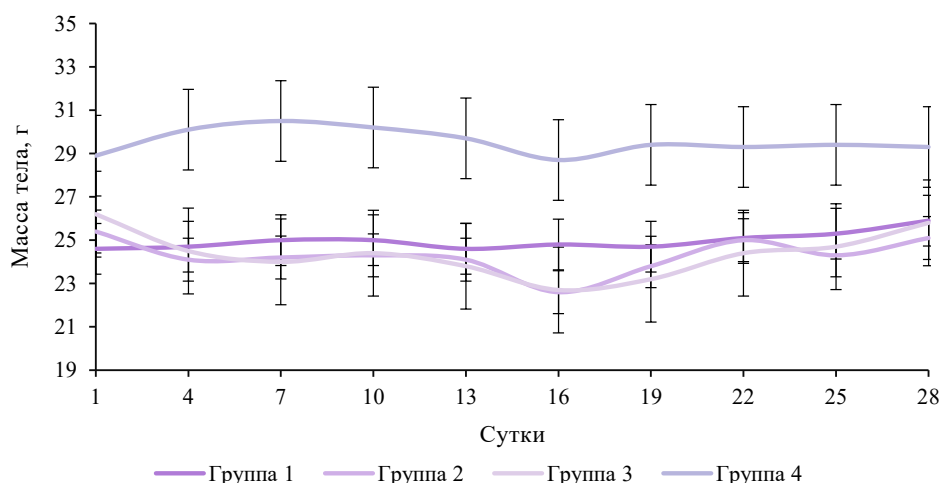


Рисунок 4. Изменение показателей массы тела животных на протяжении эксперимента

Figure 4. Body weight changes

Несмотря на то что абсолютная масса тела животных в группе 4 (стресс без коррекции) оставалась выше на протяжении всего исследования, относительная динамика показывает, что хронический стресс подавлял нормальные процессы роста, в то время как применение гидролизатов, особенно в группе 3, способствовало восстановлению и нормализации массы тела, несмотря на стрессовое воздействие. Полученные результаты могут быть объяснены комплексным влиянием гидролизата сывороточных белков и присутствием органической формы цинка на поддержание нормального функционирования организма мышей. Это согласуется с данными X.-R. Liu *et al.* [45], которые установили положительное влияние употребления гидролизатов сывороточных белков на восстановление массы тела животных после радиационного стресса. Сочетание хронического стресса у мышей и дефицита цинка способствовало снижению массы тела. Авторы связывают это с нарушением нейронных связей, регулирующих аппетит, что приводит к его снижению (при дефиците цинка), а также ослаблением иммунной системы (изменения в тимусе) на фоне повышенного уровня кортизола [45].

Анализ гормонального профиля экспериментальных животных выявил значимое повышение уровня кортизола у всех стрессированных групп животных, что подтверждает адекватность подобранной модели. Статистически значимые различия в концентрации кортизола обнаружены при межгрупповом сравнении. Так, концентрация кортизола у животных группы 2 возрастала в 4,4 раза по сравнению с показателем группы 1 и в 4,0 раза – по сравнению с группой 4. В группе 3 концентрация кортизола повышалась в 5,7 и в 5,2 раза относительно показателей групп 1 и 4 соответственно. Концентрация кортизола в группе 3 была больше на 30,87 % ($p > 0,05$) по сравнению с группой 2. У животных группы 4, потреблявших комбикорм и под-

вергавшихся стрессу, наблюдалась тенденция к повышению кортизола на 10,87 % относительно интактного контроля (рис. 5а). Повышение уровня кортизола у стрессированных групп экспериментальных животных согласуется с активацией каскадных реакций гипоталамо-гипофизарно-надпочечниковой оси, которая в ответ на стресс запускает выработку кортикотропин-рилизинг-гормона, аденокортикотропного гормона, адреналина и кортизола. Кортизол, в свою очередь, мобилизует ресурсы организма для адаптации к стрессовым факторам через перераспределение энергии, активацию глюконеогенеза, подавление иммунитета и активацию отрицательной обратной связи на всех уровнях гипоталамо-гипофизарно-надпочечниковой оси для регулирования ее активности [46].

В условиях хронического стресса у животных наблюдалось снижение уровней ТТГ и Т4 в сравнении с контрольной группой (рис. 5b и 5c). Наиболее выраженное снижение зафиксировано у животных, получавших обогащенный гидролизат: ТТГ – на 15,03 %; Т4 – на 17,44 %. Подобные изменения соответствуют литературным данным о стресс-индуцированной супрессии гипоталамо-гипофизарно-тиреоидной оси и снижении продукции периферических тиреоидных гормонов [12, 47]. Вместе с тем уровень активного Т3 у животных, употреблявших обогащенный гидролизат, был сопоставим со значениями интактной группы, тогда как в стресс-контроле наблюдалось его снижение на 9,44 % (рис. 5d). Ранее на модели хронического стресса у подопытных крыс J. Zhang *et al.* [48] и A. Castillo-Campos *et al.* [49] установили достоверное снижение уровней Т3 и Т4. Полученные результаты могут свидетельствовать о способности обогащенного гидролизата нивелировать йододефицитные состояния, вызванные стрессом.

Таким образом, проведенное исследование продемонстрировало выраженное влияние стресса на гормо-

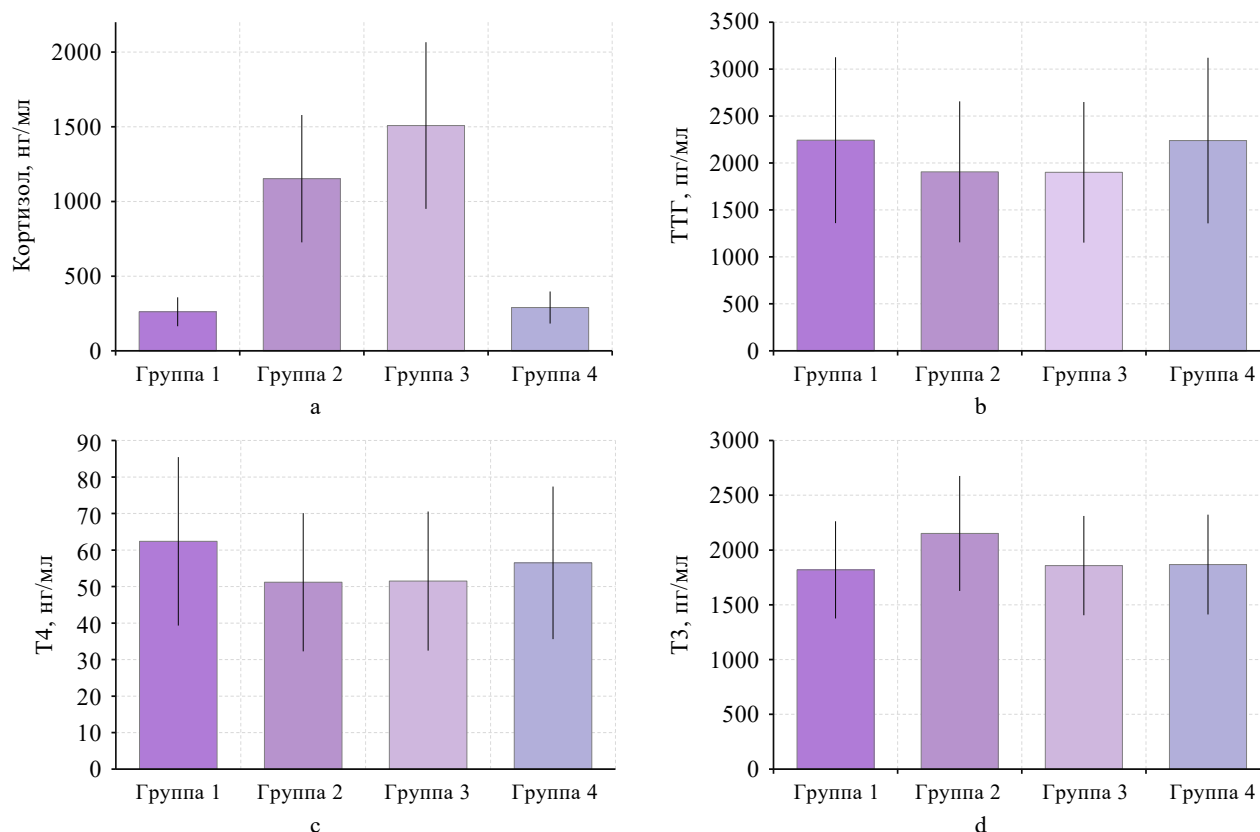


Рисунок 5. Содержание гормонов в сыворотке крови экспериментальных животных: а – кортизол; б – ТТГ; в – Т4; г – Т3

Figure 5. Hormones in blood serum (experimental group): а – cortisol; б –TSH; в –T4; and г –T3

нальный статус лабораторных животных. Полученная клиническая картина может указывать на протективный эффект гидролизата сывороточных белков с органическими формами йода и цинка при стресс-опосредованных йододефицитных состояниях, благодаря сохранению достаточного уровня активного Т3 у животных группы, потреблявшей обогащенный гидролизат.

Аутопсия внутренних органов не выявила выраженных патологических изменений. Однако у 100 % животных групп 2 и 3 обнаружено увеличение желчного пузыря и изменение окраски кишечного содержимого, что отражает особенности метаболизма гидролизата и повышенную нагрузку на билиарную систему. Подобные результаты, возможно, связаны с изменениями метаболизма желчных кислот, обусловленными трансформацией микробиоты кишечника и активацией рецепторов при употреблении исследуемых пептидов [50]. Подтверждение гипотезы требует дополнительного биохимического анализа.

Исследование относительной массы органов показало стресс-индуцированное снижение массы головного мозга (в группе 4 масса мозга достоверно ниже, чем в других), которое было нивелировано у групп 2 и 3, получавших обогащенный и необогащенный гидролизат сывороточных белков соответственно (табл. 3). Подобные положительные изменения могут быть

обоснованы доказанным нейропротективным действием гидролизата сывороточных белков, подтвержденным на моделях пожилых мышей [51] и связанным со снижением окислительного стресса и предотвращением повреждения нейронов [52].

Стресс также вызвал тенденцию к изменению относительной массы сердца. При этом обращает на себя внимание увеличение массы органа в группе 3, употреблявшей необогащенный гидролизат, не только по сравнению со стресс-контролем, но и с группой, получавшей обогащенный продукт, что требует дальнейшего изучения. Кардиопротективный эффект при употреблении сывороточных белков и их гидролизатов отражен в ряде исследований [53, 54]. Установлено, что гидролизаты защищают сердечную ткань, снижая воспаление, апоптоз и окислительный стресс в сердце у крыс с введением тиацетамида [53], а также значительно уменьшают гипертрофию сердца и повреждение кардиомиоцитов у гипертензивных особей [54]. Оба гидролизата оказали схожее влияние на селезенку, вызвав достоверное уменьшение ее относительной массы по сравнению как с интактными животными, так и с группой стресс-контроля. Это может свидетельствовать о модуляции иммунного ответа и адаптивной реакции организма в условиях хронического стресса [46], однако интерпретация этого эффекта

Таблица 3. Относительные массы внутренних органов экспериментальных животных

Table 3. Relative weights of internal organs (experimental group)

Орган	Характеристика выборки	Группа			
		1	2	3	4
Мозг	ME $\pm$ SD	1,764 $\pm$ 0,087*	1,748 $\pm$ 0,166*	1,852 $\pm$ 0,121*	1,608 $\pm$ 0,096
	P 25–75	1,695–1,820	1,737–1,811	1,777–1,938	1,529–1,652
Тимус	ME $\pm$ SD	0,098 $\pm$ 0,050	0,072 $\pm$ 0,022	0,078 $\pm$ 0,014	0,098 $\pm$ 0,047
	P 25–75	0,071–0,154	0,065–0,082	0,069–0,089	0,069–0,111
Сердце	ME $\pm$ SD	0,534 $\pm$ 0,100*	0,526 $\pm$ 0,055#	0,570 $\pm$ 0,117*	0,495 $\pm$ 0,052
	P 25–75	0,513–0,603	0,464–0,554	0,557–0,608	0,470–0,509
Легкие	ME $\pm$ SD	0,722 $\pm$ 0,220	0,737 $\pm$ 0,109	0,804 $\pm$ 0,237	0,822 $\pm$ 0,130
	P 25–75	0,602–0,849	0,655–0,823	0,673–0,885	0,747–0,879
Селезенка	ME $\pm$ SD	0,351 $\pm$ 0,181	0,249 $\pm$ 0,688*+	0,265 $\pm$ 0,031*+	0,362 $\pm$ 0,888
	P 25–75	0,314–0,434	0,213–0,263	0,252–0,279	0,343–0,412
Почка	ME $\pm$ SD	0,630 $\pm$ 0,099	0,585 $\pm$ 0,074	0,617 $\pm$ 0,037	0,574 $\pm$ 0,069
	P 25–75	0,566–0,714	0,542–0,599	0,598–0,636	0,544–0,646
Надпочечник	ME $\pm$ SD	0,025 $\pm$ 0,010	0,023 $\pm$ 0,009	0,034 $\pm$ 0,009	0,022 $\pm$ 0,008
	P 25–75	0,017–0,030	0,020–0,030	0,025–0,037	0,017–0,027
Печень	ME $\pm$ SD	5,105 $\pm$ 0,822	4,612 $\pm$ 0,526	4,779 $\pm$ 0,674	4,736 $\pm$ 0,512
	P 25–75	4,783–5,613	4,439–4,718	4,569–5,027	4,299–4,912

Примечание: + – $p < 0,05$ относительно группы 1; # – $p < 0,05$ относительно группы 3; * – $p < 0,05$ относительно группы 4.

Note: + – $p < 0.05$ vs. group 1; # – $p < 0.05$ vs. group 3; * – $p < 0.05$ vs. group 4.

нуждается в дополнительных исследованиях. Таким образом, наиболее значимый положительный эффект коррекции гидролизатами был зафиксирован в отношении сохранения массы головного мозга.

Выводы

Йододефицит и хронический стресс остаются ключевыми факторами, нарушающими эндокринно-метаболический баланс и повышающими риск дисфункции щитовидной железы. Особую актуальность приобретает поиск безопасных нутрицевтических средств для их коррекции и профилактики в контексте улучшения состояния здоровья населения. В исследовании установлено, что гидролизат сывороточных белков с органическими формами йода и цинка безопасен ($LD_{50} > 5000$ мг/кг) и относится к IV классу опасности, не проявляя острого раздражающего действия. В условиях хронического стресса применение обогащенного гидролизата сопровождалось снижением тревожности у экспериментальных животных. Результаты теста «Открытое поле» отражают максимальную медианную пройденную дистанцию ($14,35 \pm 6,66$ м), наивысший коэффициент мобильности (до 98 %) и незначительное количество эпизодов замирания. Тест «О-лабиринт» дополнил данные, показав наибольшее время нахождения в открытых зонах ($36,93 \pm 19,35$ с). Употребление животными обогащенного гидролизата продемонстрировало способность восстанавливать массу тела на фоне стресса. Исследуемый обогащенный продукт поддерживает периферическую конвертацию тиреоидных гормонов, сохраняя уровень Т3. Также выявлен протективный эффект в отношении головного мозга: относительная

масса органа у животных опытной группы не снижалась и оставалась сопоставимой с интактными значениями, тогда как у стресс-контроля наблюдалось достоверное уменьшение. Совокупность результатов позволяет рассматривать обогащенный гидролизат сывороточных белков с органическими формами йода и цинка как безопасный и функционально активный пищевой ингредиент, способный снижать выраженность стресс-индуцированных нарушений, поддерживать эндокринно-метаболическую стабильность и сохранять нейропротективные ресурсы организма. Новые данные позволяют продолжить проведение клинических исследований обогащенного гидролизата и в перспективе расширить ассортимент нутрицевтических средств для коррекции йододефицитных состояний.

Критерии авторства

И. А. Барковская – разработка концепции и дизайна исследования; подготовка к проведению исследования; сбор, анализ и интерпретация данных и материалов; подготовка и редактирование текста статьи. Е. И. Муклецова, А. А. Агарков – подготовка к проведению исследования. А. Е. Рябова, А. Н. Петров – подготовка статьи к публикации. Все авторы согласовали и утвердили окончательный вариант текста рукописи и несут равную ответственность за ее целостность, достоверность материалов и плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии потенциальных конфликтов интересов в отношении исследования, авторства и / или публикации данной статьи.

Contribution

I.A. Barkovskaya developed of the research concept and design, prepared for research, collected, analyzed, and interpreted of data and materials, prepared and edited of the text of the article. E.I. Mukletsova, A.A. Agarkov prepared the experimental conditions. A.E. Ryabova and A.N. Petrov prepared the article for publication. All authors have read and approved the final version of the

article. The authors bear equal responsibility for the research integrity, data accuracy, and originality of the manuscript.

Conflict of interest

The authors declared no potential conflict of interest regarding the research, authorship, and/or publication of this article.

Список литературы / References

1. Барковская И. А., Рябова А. Е., Рожкова И. В. Комплексная модификация белкового профиля молочной сыворотки как подход к созданию обогащенных белковых ингредиентов. Пищевые системы. 2025. Т. 2. № 8. С. 221–230. [Barkovskaya IA, Ryabova AE, Rozhkova IV. Complex modification of whey protein profile as an approach to the creation of enriched protein ingredients. Food systems. 2025;8(2):221–230. (In Russ.)] <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-2-221-230>
2. Барковская И. А., Кручинин А. Г., Рожкова И. В. Дефицит йода в России: современное состояние проблемы, мировая практика и новые подходы к терапии. Пищевые системы. 2024. Т. 2. № 7. С. 238–245. [Barkovskaya IA, Kruchinin AG, Rozhkova IV. Iodine deficiency in Russia: Current state of the problem, global practice and new approaches to therapy. Food systems. 2024;7(2):238–245. (In Russ.)] <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2024-7-2-238-245>
3. Hatch-McChesney A, Lieberman HR. Iodine and iodine deficiency: A comprehensive review of a reemerging issue. *Nutrients*. 2022;14(17):3474. <https://doi.org/10.3390/nu14173474>
4. Passarelli S, Free CM, Shepon A, Beal T, Batis C, et al. Global estimation of dietary micronutrient inadequacies: A modelling analysis. *The Lancet Global Health*. 2024;12(10):E1590–E1599. [https://doi.org/10.1016/S2214-109X\(24\)00276-6](https://doi.org/10.1016/S2214-109X(24)00276-6)
5. Lin J, Tan HL, Ge H. Global, regional, and national burden of iodine deficiency in reproductive women from 1990 to 2019, and projections to 2035: A systematic analysis for the Global Burden of Disease Study in 2019. *International Journal of Women's Health*. 2025;17:1863–1875. <https://doi.org/10.2147/IJWH.S513856>
6. Bhattacharjee NV, Schumacher AE, Aali A, Abate YH, Abbasgholizadeh R, et al. Global fertility in 204 countries and territories, 1950–2021, with forecasts to 2100: A comprehensive demographic analysis for the Global Burden of Disease Study 2021. *Lancet*. 2024;403(10440):2057–2099. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(24\)00550-6](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(24)00550-6)
7. Liu J, Tan HL, Ge H. Global, regional, and national burden of female infertility and trends from 1990 to 2021 with projections to 2050 based on the GBD 2021 analysis. *Scientific Reports*. 2025;15:17559. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-01498-x>
8. Bauer M, Whybrow PC. Role of thyroid hormone therapy in depressive disorders. *Journal of Endocrinological Investigation*. 2021;44:2341–2347. <https://doi.org/10.1007/s40618-021-01600-w>
9. Feldt-Rasmussen U, Effraimidis G, Klose M. The hypothalamus-pituitary-thyroid (HPT)-axis and its role in physiology and pathophysiology of other hypothalamus-pituitary functions. *Molecular and Cellular Endocrinology*. 2021;525:111173. <https://doi.org/10.1016/j.mce.2021.111173>
10. Montanari A, Wang L, Birenboim A, Basile C. Urban environment influences on stress, autonomic reactivity and circadian rhythm: Protocol for an ambulatory study of mental health and sleep. *Frontiers in Public Health*. 2024;12:1175109. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2024.1175109>
11. Галстян А. Г., Петров А. Н., Юрова Е. А., Зобкова З. С., Пряничникова Н. С. и др. Киберфизические компоненты пищевой метаинженерии. Вестник Российской академии наук. 2025. № 6. С. 77–84. [Galstyan AG, Petrov AN, Yurova EA, Zobkova ZS, Pryanichnikova NS, et al. Cyber-physical components of food meta-engineering. *Vestnik RAN*. 2025;(6):77–84. (In Russ.)] <https://doi.org/10.7868/S3034520025060099>
12. Petrowski K, Kahaly GJ. Stress and thyroid function – from bench to bedside. *Endocrine Reviews*. 2025;46(3):bnaf015. <https://doi.org/10.1210/endrev/bnaf015>
13. Молибога Е. А., Сухостав Е. В., Козлова О. А., Зинич А. В. Анализ рынка функционального питания: российский и международный аспект. Техника и технология пищевых производств. 2022. Т. 52. № 4. С. 775–786. [Moliboga EA, Sukhostav EV, Kozlova OA, Zinich AV. Functional food market analysis: Russian and international aspects. *Food Processing: Techniques and Technology*. 2022;52(4):775–786. (In Russ.)] <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2022-4-2405>
14. Велямов Ш. М., Велямов М. Т., Уразбаев Ж. З., Бакытжан Т. Н., Абитбекова А. У. Функциональные компоненты питания: технология получения концентрата, содержащего ликопин, из томатного сырья. *Food Metaengineering*. 2025. Т. 3. № 1. С. 33–41. [Velyamov ShM, Velyamov MT, Urazbayev ZhZ, Bakytzhan TN, Abitbekova AU. Functional components in nutrition: Technology for producing a lycopene-containing concentrate from tomato raw materials. *Food Metaengineering*. 2025;3(1):33–41. (In Russ.)] <https://doi.org/10.37442/fme.2025.1.77>

15. Пряничникова Н. С., Агарков К. В., Блиадзе В. Г., Глазунова Д. Н., Агаркова Е. Ю. и др. Интенсификация технологии безлактозного творога высокой питательной ценности. Пищевая промышленность. 2024. № 11. С. 42–45. [Pryanichnikova NS, Agarkov KV, Bliadze VG, Glazunova DN, Agarkova EYu, *et al.* Intensification of technology of lactose-free cottage cheese of high nutritional value. Food Industry. 2024;(11):42–45. (In Russ.)] <https://doi.org/10.52653/PPI.2024.11.11.008>
16. Тихомирова Н. А., Тъяу Н. Б. Состояние и перспективы рынка специализированной низколактозной продукции. Вестник государственного социально-гуманитарного университета. 2021. № 4. С. 60–67. [Tikhomirova NA, Chau NB. An outlook on the market of specialized low-lactose products. Bulletin of the State University for the Humanities and Social Sciences. 2021;(4):60–67. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/ZTKKLR>
17. Бычкова Т. С., Донская Г. А., Крутина Е. М. Оценка технологических свойств противолучевой добавки и ее применение в кисломолочной продукции специализированной направленности. Пищевая промышленность. 2024. № 11. С. 24–28. [Bychkova TS, Donskaya GA, Krutina EM. Evaluation of the technological properties of an anti-radiation additive and its use in fermented milk products for specialized purposes. Food processing Industry. 2024;(11):24–28. (In Russ.)] <https://doi.org/10.52653/PPI.2024.11.11.004>
18. Зобкова З. С., Лазарева Е. Г., Шелагинова И. Р. Выбор ингредиентов с антиоксидантными свойствами для функциональных кисломолочных продуктов. Молочная промышленность. 2021. № 6. С. 48–49. [Zobkova ZS, Lazareva EG, Shelaginova IR. Selection of ingredients with antioxidant properties for functional fermented milk products. Dairy Industry. 2021;(6):48–49. (In Russ.)] <https://doi.org/10.31515/1019-8946-2021-06-48-49>
19. Коростелева М. М., Агаркова Е. Ю. Принципы обогащения пищевых продуктов функциональными ингредиентами. Молочная промышленность. 2020. № 11. С. 6–8. [Korosteleva MM, Agarkova EYu. Principles of food fortification with functional ingredients. Dairy Industry. 2020;(11):6–8. (In Russ.)] <https://doi.org/10.31515/1019-8946-2020-11-6-8>
20. Донская Г. А., Креккер Л. Г., Колосова Е. В., Бычкова Т. С. Особенности профилактической защиты от радиоактивного йода. Пищевая промышленность. 2024. № 1. С. 50–55. [Donskaya GA, Krekker LG, Kolosova EV, Bychkova TS. Features of preventive protection against radioactive iodine. Food processing Industry. 2024;(1):50–55. (In Russ.)] <https://doi.org/10.52653/PPI.2024.1.1.009>
21. Савлукова Ю. О., Ковалева Е. Г. Получение функционального йогурта, обогащенного йодом в биодоступной форме. Вестник ЮУрГУ. Серия: Пищевые и биотехнологии. 2023. Т. 11. № 2. С. 83–92. [Savlukova YuO, Kovaleva EG. Production of functional yogurt enriched with iodine in a bioavailable form. Bulletin of South Ural State University. Series: Food and Biotechnology. 2023;11(2):83–92. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/HMHNLC>
22. Бирюкова З. А., Пантелеева О. Г., Юрова Е. А., Гончарова А. Я. Сохранность йода в молоке при стерилизации и хранении. Молочная промышленность. 2014. № 10. С. 54–56. [Biryukova ZA, Panteleeva OG, Yurova EA, Goncharova AY. Preservation of iodine in fortified milk at sterilization and storage. Dairy Industry. 2014;(10):54–56. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/SUJOJT>
23. Зобкова З. С. Уточненный перечень действующей ТД на производство цельномолочных продуктов. Молочная промышленность. 2018;11:42–47. [Zobkova ZS. Elaborated list of the acting technical documentation for the fresh milk products. Dairy Industry. 2018;(11):42–47. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/YMSBHN>
24. Зобкова З. С. Внедрение и коммерциализация результатов научно-исследовательских работ в цельномолочной отрасли. Актуальные вопросы молочной промышленности, межотраслевые технологии и системы управления качеством. 2020. Т. 1. № 1. С. 199–204. [Zobkova ZS. Implementation and commercialization of the investigations results in whole milk branch. Current Issues of the Dairy Industry, Cross-Sectoral Technologies and Quality Management Systems. 2020;1(1):199–204. (In Russ.)] <https://doi.org/10.37442/978-5-6043854-1-8-2020-1-199-204>
25. Степычева Н. В., Патронова С. А. Творог, обогащенный йодказеином. Молочная промышленность. 2020. № 8. С. 52–53. [Stepycheva NV, Patronova SA. The curd enriched with iodcasein. Dairy Industry. 2020;(8):52–53. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/QRMNWC>
26. Сушков Д. Д., Костинова М. А., Беляев А. Г., Беляева И. В. Исследование качества образцов мясных продуктов, обогащенных йодсодержащими добавками: материалы Междунар. науч.-техн. конф. «Пищевая индустрия в современных условиях: тренды и инновации». Орел, 2021. С. 223–228. [Sushkov DD, Kostinova MA. Belyaev AG, Belyaeva IV. Investigation of the quality of samples of meat products enriched with iodine-containing additives (Yodpectin, “Iodine-Active” 100). Proceeding Intern. Sci. Conf. Orel, 2021. pp. 223–228. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/MCUPCE>
27. Бойцова Т. М., Шеметова Е. В., Гниломедова В. О. Обоснование и разработка кисломолочных продуктов, обогащенных ламинарией. Индустрия питания. 2021. Т. 6. № 4. С. 47–54. [Boytsova TM, Shemetova EV, Gnilomedova VO. Justification and development of fermented milk products enriched with laminaria. Food Industry. 2021;6(4):47–54. (In Russ.)] <https://doi.org/10.29141/2500-1922-2021-6-4-5>
28. Большакова Л. С., Лукин Д. Е., Меркулова Е. Г., Ладнова О. Л., Медяник А. А. Применение йодированного молочного белка в технологии молока, обогащенного йодом. Технология и товароведение инновационных пищевых продуктов. 2023. Т. 2. № 79. С. 39–44. [Bolshakova LS, Lukin DE, Merkulova EG, Ladnova OL, Medyanik AA. Application of iodized milk protein in the technology of milk enriched with iodine. Technology and Merchandising of Innovative Food Products. 2023;2(79):39–44. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/WOFJCA>

29. Киреева О. С. Применение природного йодсодержащего ингредиента в рецептуре обогащенных вафельных хлебцев. Пищевые системы. 2021. Т. 4. № 3S. С. 121–124. [Kireeva OS. Application of natural iodine-containing ingredient in enriched waffles crispbreads. Food Systems. 2021;4(3S):121–124. (In Russ.)] <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2021-4-3S-121-124>
30. Барковская И. А., Рябова А. Е. Апробация технологических решений для производства обогащенного молока. Сыроделие и маслоделие. 2025. № 2. С. 49–54. [Barkovskaya IA, Ryabova AE. New technological solutions in functional milk drinks. Cheese and Butter Making. 2025;(2):49–54. (In Russ.)] <https://doi.org/10.21603/2073-4018-2025-2-23>
31. Arias-Borrego A, Velasco I, Gómez-Ariza JL, García-Barrera T. Iodine deficiency disturbs the metabolic profile and elemental composition of human breast milk. Food Chemistry. 2022;371:131329. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.131329>
32. Severo JS, Morais JBS, Freitas TEC, Andrade ALP, Feitosa MM, et al. The role of zinc in thyroid hormones metabolism. International Journal for Vitamin and Nutrition Research. 2019;89(1–2):80–88. <https://doi.org/10.1024/0300-9831/a000262>
33. Shulhai A-M, Rotondo R, Petraroli M, Patianna V, Predieri B, et al. The role of nutrition on thyroid function. Nutrients. 2024;16(15):2496. <https://doi.org/10.3390/nu16152496>
34. Akkurt G, Kartal B, Alimoğullari M, Çaylı S, Alimoğullari E. Effects of regular whey protein consumption on rat thyroid functions. Turkish Journal of Medical Sciences. 2021;51(4):2213–2221. <https://doi.org/10.3906/sag-2010-270>
35. Daliri EB-M, Oh DH, Lee BH. Bioactive peptides. Foods. 2017;6(5):32. <https://doi.org/10.3390/foods6050032>
36. Hussein FA, Chay SY, Ghanisma SBM, Zarei M, Auwal SM, et al. Toxicity study and blood pressure-lowering efficacy of whey protein concentrate hydrolysate in rat models, plus peptide characterization. Journal of Dairy Science. 2020;103(3):2053–2064. <https://doi.org/10.3168/jds.2019-17462>
37. Peighambardoust SH, Karami Z, Pateiro M, Lorenzo JM. A review on health-promoting, biological, and functional aspects of bioactive peptides in food applications. Biomolecules. 2021;11(5):631. <https://doi.org/10.3390/biom11050631>
38. Liu L, Li S, Zheng J, Bu T, He G, et al. Safety considerations on food protein-derived bioactive peptides. Trends in Food Science & Technology. 2020;96:199–207. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.12.022>
39. Akbarian M, Khani A, Eghbalpour S, Uversky VN. Bioactive peptides: Synthesis, sources, applications, and proposed mechanisms of action. International Journal of Molecular Sciences. 2022;23(3):1445. <https://doi.org/10.3390/ijms23031445>
40. Liang W, Zhao Y, Cai B, Huang Y, Chen X, et al. Psychological stress induces hair regenerative disorders through corticotropin-releasing hormone-mediated autophagy inhibition. Biochemical and Biophysical Research Communications. 2024;699:149564. <https://doi.org/10.1016/j.bbrc.2024.149564>
41. Ahn D, Kim H, Lee B, Hahm DH. Psychological stress-induced pathogenesis of alopecia areata: Autoimmune and apoptotic pathways. International Journal of Molecular Sciences. 2023;24(14):11711. <https://doi.org/10.3390/ijms241411711>
42. Lee K, Jung Y, Vyas Y, Skelton I, Abraham WC, et al. Dietary zinc supplementation rescues fear-based learning and synaptic function in the Tbr1^{+/−} mouse model of autism spectrum disorders. Molecular Autism. 2022;13(1):13. <https://doi.org/10.1186/s13229-022-00494-6>
43. Bederska-Łojewska D, Szczepanik K, Turek J, Machaczka A, Gąsior Ł, et al. Dietary zinc restriction and chronic restraint stress affect mice physiology, immune organ morphology, and liver function. Nutrients. 2024;16(22):3934. <https://doi.org/10.3390/nu16223934>
44. Yu D, Zhou H, Yang Y, Jiang Y, Wang T, et al. The bidirectional effects of hypothyroidism and hyperthyroidism on anxiety- and depression-like behaviors in rats. Hormones and Behavior. 2015;69:106–115. <https://doi.org/10.1016/j.yhbeh.2015.01.003>
45. Liu X-R, Zhu N, Hao Y-T, Yu X-C, Li Z, et al. Radioprotective effect of whey hydrolysate peptides against γ -radiation-induced oxidative stress in BALB/c mice. Nutrients. 2021;13(3):816. <https://doi.org/10.3390/nu13030816>
46. Herman JP, McKlveen JM, Ghosal S, Kopp B, Wulsin A, et al. Regulation of the hypothalamic-pituitary-adrenocortical stress response. Comprehensive Physiology. 2016;6(2):603–621. <https://doi.org/10.1002/cphy.c150015>
47. Helmreich DL, Tylee D. Thyroid hormone regulation by stress and behavioral differences in adult male rats. Hormones and Behavior. 2011;60(3):284–291. <https://doi.org/10.1016/j.yhbeh.2011.06.003>
48. Zhang J, Huang J, Aximujiang K, Xu C, Ahemaiti A, et al. Thyroid dysfunction, neurological disorder and immunosuppression as the consequences of long-term combined stress. Scientific Reports. 2018;8:4552. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-19564-y>
49. Castillo-Campos A, Gutiérrez-Mata A, Charli J-L, Joseph-Bravo P. Chronic stress inhibits hypothalamus-pituitary-thyroid axis and brown adipose tissue responses to acute cold exposure in male rats. Journal of Endocrinological Investigation. 2021;44(4):713–723. <https://doi.org/10.1007/s40618-020-01328-z>
50. Zhou H, Hylemon PB. Bile acids are nutrient signaling hormones. Steroids. 2014;86:62–68. <https://doi.org/10.1016/j.steroids.2014.04.016>
51. Ding N, Meng H, Wu C, Yokoyama W, Hong H, et al. Whey protein hydrolysate renovates age-related and scopolamine-induced cognitive impairment. Nutrients. 2023;15(5):1228. <https://doi.org/10.3390/nu15051228>

52. Chang YB, Jung E-J, Jo K, Suh HJ, Choi H-S. Neuroprotective effect of whey protein hydrolysate containing leucine-aspartate-isoleucine-glutamine-lysine on HT22 cells in hydrogen peroxide-induced oxidative stress. *Journal of Dairy Science*. 2024;107(5):2620–2632. <https://doi.org/10.3168/jds.2023-24284>
53. Almohawes ZN, Okail HA, Al-Megrin WA, El-Khadragy MF, Ibrahim MA, *et al.* Cardioprotective effect of whey protein against thioacetamide-induced toxicity through its antioxidant, anti-inflammatory, and anti-apoptotic effects in male albino rats. *Frontiers in Veterinary Science*. 2025;12:1590722. <https://doi.org/10.3389/fvets.2025.1590722>
54. Dou P, Li X, Zou X, Wang K, Yao L, *et al.* Antihypertensive effects of whey protein hydrolysate involve reshaping the gut microbiome in spontaneously hypertensive rats. *Food Science and Human Wellness*. 2024;13(4):1974–1986. <https://doi.org/10.26599/FSHW.2022.9250164>

Дополнительная информация об авторах / Additional information about the authors

Барковская Ирина Александровна / Irina A. Barkovskaya ORCID 0000-0003-4779-1076; eLIBRARY SPIN 9404-4365
Муклецова Евгения Игоревна / Evgenia I. Mukletsova ORCID 0009-0007-5823-9371; eLIBRARY SPIN 6356-8298
Агарков Александр Александрович / Alexandr A. Agarkov ORCID 0000-0001-7259-4256; eLIBRARY SPIN 8058-8865
Рябова Анастасия Евгеньевна / Anastasia E. Ryabova ORCID 0000-0002-5712-2020; eLIBRARY SPIN 8425-8422
Петров Андрей Николаевич / Andrey N. Petrov ORCID 0000-0001-9879-482X; eLIBRARY SPIN 2839-1773

<https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-2-2645>
<https://elibrary.ru/TBVLHV>

Оригинальная статья
<https://fptt.ru>

Генетические детерминанты антагонистической и ростостимулирующей активности штамма *Pantoea pleuroti*



Ю. Р. Серазетдинова¹, Н. В. Фотина¹, А. Е. Тупикин²,
Н. А. Любимова¹, Л. К. Асякина^{1,*}

¹ Кемеровский государственный университет^{ROR}, Кемерово, Россия

² Институт химической биологии и фундаментальной медицины им. Д. Г. Кнорре СО РАН^{ROR}, Новосибирск, Россия

Поступила в редакцию: 02.03.2026

Принята после рецензирования: 30.05.2026

Принята к публикации: 02.06.2026

*e-mail: alk_kem@mail.ru

© Ю. Р. Серазетдинова, Н. В. Фотина, А. Е. Тупикин,

Н. А. Любимова, Л. К. Асякина, 2026



Аннотация.

Злаковые культуры играют ключевую роль в обеспечении продовольственной безопасности, однако интенсивное применение агрохимикатов сопровождается деградацией почвенных экосистем и ростом экологических рисков. В связи с этим возрастает интерес к микробным агентам биологического контроля. Представители рода *Pantoea* рассматриваются как перспективные бактерии, стимулирующие рост растений и подавляющие фитопатогены, несмотря на это, их практическое применение требует молекулярно-генетической оценки биобезопасности и метаболического потенциала. Цель исследования – провести полногеномный анализ и биоинформатическую характеристику кластеров биосинтеза вторичных метаболитов штамма *Pantoea pleuroti* B-14756 для оценки его генетического и метаболического потенциала в качестве агента биоконтроля фитопатогенов злаковых культур.

Объектом исследования являлся штамм *P. pleuroti* B-14756, депонированный в Национальном биоресурсном центре Всероссийской коллекции промышленных микроорганизмов НИЦ «Курчатовский институт» (Москва, Россия). Полногеномное секвенирование выполняли на платформах MGISEQ-2000 и Polyseq One. Сборку генома *de novo*, полировку и аннотацию осуществляли с использованием биоинформатических инструментов Flye, Raven, TruSeq, Medaka, Polypolish, POLCA, BUSCO, Bakta и antiSMASH.

В результате секвенирования и сборки получен геном *P. pleuroti* B-14756 размером 4 735 406 п.н. с GC-составом 53 %. Аннотация генома выявила 4416 кодирующих последовательностей, 7 кластеров рРНК и 78 тРНК. С использованием antiSMASH идентифицировано 9 кластеров биосинтеза вторичных метаболитов, включая кластеры, ассоциированные с синтезом азобактина, десферриоксамина Е и каротиноидов. Азобактин и десферриоксамина Е обладают способностью к связыванию, хелатированию и последующему импорту ионов железа, тогда как каротиноиды выполняют антиоксидантную функцию, защищая клетку от активных форм кислорода в стрессовых условиях.

Обнаружение у *P. pleuroti* B-14756 биосинтетических кластеров вторичных метаболитов (NRPS, RiPP, фосфонатных и терпеновых путей) подтверждает выраженный антагонистический потенциал штамма и перспективность применения в биологическом контроле фитопатогенов.

Ключевые слова. *Pantoea pleuroti*, биологический контроль, вторичные метаболиты, полногеномное секвенирование, биоинформатический анализ, сидерофоры, антагонистическая активность

Финансирование. Исследование выполнено в рамках гранта Российского научного фонда по теме научного проекта «Новые бактериальные штаммы рода *Pantoea* в повышении устойчивости злаковых культур к фитопатогенам» (№ 25-16-20076) при финансовой поддержке Российского научного фонда (соглашение № 25-16-20076 от 17.04.2025 г.) и Министерства образования Кузбасса (соглашение № 01/2025 от 10.04.2025 г.).

Для цитирования: Серазетдинова Ю. Р., Фотина Н. В., Тупикин А. Е., Асякина Л. К., Любимова Н. А. Генетические детерминанты антагонистической и ростостимулирующей активности штамма *Pantoea pleuroti*. Техника и технология пищевых производств. 2026. Т. 56. № 2. С. 234–246. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-2-2645>

Genetic Determinants of Antagonistic and Growth-Stimulating Activity of *Pantoea pleuroti*



Yuliya R. Serazetdinova¹, Natalya V. Fotina¹,
Alexey E. Tupikin², Nadezhda A. Lyubimova¹, Lyudmila K. Asyakina^{1,*}

¹ Kemerovo State University^{ROR}, Kemerovo, Russia

² Institute of Chemical Biology and Fundamental Medicine SB RAS^{ROR}, Novosibirsk, Russia

Received: 02.03.2026

Revised: 30.05.2026

Accepted: 02.06.2026

*e-mail: alk_kem@mail.ru

© Yu.R. Serazetdinova, N.V. Fotina, A.E. Tupikin, N.A. Lyubimova,
L.K. Asyakina, 2026



Abstract.

Cereals are crucial to food security, but intensive agrochemical farming depletes soil ecosystems and increases environmental risks. In this regard, microbial biological control agents hold great promise. The bacterial genus *Pantoea* stimulates plant growth and suppresses phytopathogens. However, its practical application requires a molecular genetic assessment of its biosafety and metabolic potential. A genome-wide bioinformatic analysis of the biosynthesis of *Pantoea pleuroti* B-14756 secondary metabolites was conducted to assess its genetic and metabolic potential as a biocontrol agent for phytopathogens of cereal crops.

The strain of *P. pleuroti* B-14756 was obtained from the National Bioresource Center at the Kurchatov Institute (Moscow, Russia). Genome-wide sequencing was performed on the MGISEQ-2000 and Polyseq One platforms. The genome was assembled de novo, polished, and annotated using the following bioinformatics tools: Flye, Raven, Tricycler, Medaka, Polypolish, POLCA, BUSCO, Bakta, and antiSMASH.

The sequencing and assembly yielded the *P. pleuroti* B-14756 genome with a size of 4,735,406 bp and a GC content of 53%. The genome annotation revealed 4,416 coding sequences, seven rRNA clusters, and 78 tRNAs. The antiSMASH analysis revealed nine clusters of secondary metabolite biosynthesis, including clusters associated with the synthesis of aerobactin, desferrioxamine E, and carotenoids. Aerobactin and desferrioxamine E demonstrate the ability to bind, chelate, and subsequently import iron ions, while carotenoids perform an antioxidant function, protecting the cell from reactive oxygen species under stressful conditions.

P. pleuroti B-14756 was proved to possess biosynthetic clusters of secondary metabolites (including NRPS, RiPP, phosphonate, and terpene pathways). This finding confirms the pronounced antagonistic potential of the strain and its promising application in the biological control of phytopathogens.

Keywords. *Pantoea pleuroti*, biological control, secondary metabolites, whole-genome sequencing, bioinformatics analysis, siderophores, antagonistic activity

Funding. The study was carried out within the framework of a grant from the Russian Science Foundation on the scientific project «New bacterial strains of the genus *Pantoea* in increasing the resistance of cereal crops to phytopathogens» (№. 25-16-20076) with the financial support of the Russian Science Foundation (agreement №. 25-16-20076 dated 04/17/2025) and the Ministry of Education of Kuzbass (agreement №. 01/2025 dated 04/10/2025).

For citation: Serazetdinova YuR, Fotina NV, Tupikin AE, Lyubimova NA, Asyakina LK. Genetic Determinants of Antagonistic and Growth-Stimulating Activity of *Pantoea pleuroti*. Food Processing: Techniques and Technology. 2026;56(2):234–246. (In Russ.) <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-2-2645>

Введение

Сельское хозяйство выступает как стратегически значимая отрасль экономики, обеспечивающая удовлетворение базовых физиологических потребностей населения и поддержание продовольственной безопасности государств [1, 2]. Злаковые культуры, включая пшеницу, ячмень, рис и другие виды, формируют фундамент глобальной продовольственной системы, представляя собой основные источники углеводов, белков и ряда микронутриентов для человека, а также ключе-

вые компоненты кормовой базы животноводства [3]. Их устойчивое производство напрямую определяет стабильность агропродовольственных рынков и социально-экономическое развитие сельских территорий.

Пшеница относится к числу наиболее широко возделываемых сельскохозяйственных культур в мире (площадь посевов превышает 218 млн га) и характеризуется высоким уровнем международного товарооборота, превосходящим показатели большинства других культур. Она является одним из ведущих источников

питательных веществ примерно для 40 % населения планеты и покрывает около 20 % суточной потребности человека в белке и калориях [4, 5]. В структуре продовольственного обеспечения развивающихся стран пшеница занимает второе место после риса. При этом, по оценкам, около 80 млн сельхозпроизводителей напрямую зависят от ее возделывания как основного источника дохода и занятости.

В условиях глобальных климатических изменений, деградации природных ресурсов и роста численности населения достижение продовольственной безопасности рассматривается как одна из приоритетных задач XXI в. [6]. С учетом возрастающей роли зерновых культур в формировании продовольственных и кормовых ресурсов, увеличение производства пшеницы и ячменя должно осуществляться с соблюдением принципов экологической и экономической устойчивости. Реализация данной задачи предполагает внедрение научно обоснованных систем управления агроэкосистемами, направленных на оптимизацию почвенных процессов, рациональное использование водных и питательных ресурсов, а также снижение антропогенной нагрузки на окружающую среду.

Агрохимические препараты представляют собой результат реализации высокотехнологичных решений в растениеводстве, основывающихся на применении минеральных удобрений и пестицидов для управления продуктивностью сельскохозяйственных культур [7, 8]. В странах с развивающейся экономикой их применение носит масштабный характер, что обусловлено интенсификацией сельскохозяйственного производства и ориентацией на достижение максимально возможных показателей урожайности. Начиная со второй половины XX в. пестициды и агрохимические препараты стали неотъемлемым элементом глобальной аграрной системы, обеспечив существенное повышение продуктивности культур и увеличение объемов производства продовольствия [9]. Вместе с тем продолжающийся рост численности населения увеличивает потребность в дальнейшем наращивании производства сельскохозяйственной продукции.

Системное применение химических средств защиты растений для контроля вредителей и возбудителей болезней сельскохозяйственных культур создает значительные риски для здоровья человека и состояния окружающей среды. Избыточное использование данных соединений сопровождается как краткосрочными токсикологическими эффектами, так и долгосрочными неблагоприятными последствиями, проявляющимися в деградации экосистем и накоплении устойчивых загрязнителей. В последние годы проблема деградации почв все чаще характеризуется в научной литературе как «глобальная пандемия», что подчеркивает ее транснациональный и системный характер [10, 11].

Деградация земель и почвенного покрова включает комплекс взаимосвязанных процессов: утрату плодородного слоя, водную и ветровую эрозию, вторичное

засоление, закисление, уплотнение, а также снижение биологической активности и структуры почвы. Степень выраженности последствий и потенциал восстановления агроландшафтов во многом определяются природой и интенсивностью деградационных процессов. При этом эрозия и засоление относятся к числу наиболее тяжелых форм деградации, поскольку приводят к существенному снижению продуктивности земель, экономическим потерям и, в ряде случаев, к вынужденному отказу от их дальнейшего сельскохозяйственного использования либо к значительному увеличению затрат на поддержание урожайности. Наиболее остро данные процессы проявляются в густонаселенных аграрных регионах с высокой степенью антропогенной нагрузки на почвенные ресурсы [10, 12].

Микробные средства биологического контроля рассматриваются как экологически ориентированная альтернатива синтетическим пестицидам для защиты сельскохозяйственных культур от фитопатогенов и фитопатогенных микроорганизмов [13]. Особую значимость представляют бактерии ризосферы, обладающие способностью стимулировать рост и развитие растений и объединяемые в группу ризобактерий [14]. Их практическое применение в агроэкосистемах обусловлено комплексным воздействием на растение, включающим фитостимулирующий эффект, улучшение минерального питания, а также реализацию механизмов биологического контроля возбудителей болезней. Установлено, что ассоциации растений с ризобактериями способствуют повышению фитосанитарного статуса посевов, усилению роста и продуктивности, подавлению патогенной микрофлоры, повышению доступности элементов питания и эффективности их усвоения [15, 16].

В условиях глобальной проблемы нерационального и избыточного применения химических средств защиты растений биопрепараты приобретают все большее значение в системе устойчивого земледелия. По сравнению с традиционными химическими пестицидами биопестициды отличаются более благоприятным экологическим профилем и пониженным уровнем токсикологической нагрузки на окружающую среду. Способность одновременно стимулировать рост растений и ингибировать развитие фитопатогенов определяет важную роль в современных технологиях растениеводства. Биологические препараты могут опосредованно усиливать продуктивность культур за счет регуляции микробных сообществ и прямого подавления возбудителей заболеваний [17, 18].

Биологический контроль болезней растений в настоящее время рассматривается как перспективное технологическое решение, направленное на минимизацию пестицидной нагрузки путем частичного или полного отказа от применения химических средств защиты. За последние десятилетия идентифицированы и детально охарактеризованы многочисленные таксоны полезных бактерий, ассоциированных с растениями, в т. ч. представителей рода *Pantoea*. Многие из этих

микроорганизмов формируют устойчивые симбиотические или ассоциативные связи с растениями-хозяевами. Почвенные бактерии могут колонизировать ризосферу, заселять поверхность корней в качестве эпифитов либо проникать во внутренние ткани растения как эндофиты. Защитное действие полезных бактерий реализуется посредством различных механизмов: конкуренции с фитопатогенами за субстраты и экологические ниши, продукции антимикробных метаболитов с фунгицидной или бактерицидной активностью, а также индукции локальной или системной устойчивости растений к инфекционным агентам [19, 20].

Бактерии рода *Pantoea* относятся к семейству *Enterobacteriaceae* и включают множество видов, что отражает их высокое генетическое и функциональное разнообразие [21]. Они имеют палочковидную форму, грамтрицательны и образуют колонии желтого цвета. В настоящее время идентифицировано около 20 различных видов *Pantoea* со сходными фенотипическими признаками [22]. Данный род привлекает все больше внимания благодаря своему биотехнологическому потенциалу, особенно в контексте стимуляции роста растений. Некоторые штаммы инициируют рост растений, используя такие механизмы, как растворение фосфатов, фиксация азота, синтез фитогормонов и сидерофоров [23, 24]. Кроме того, штаммы повышают устойчивость растений к стрессу, вызванному засухой [25]. Отдельные представители способны устанавливать симбиотические связи с растениями, способствуя их росту и развитию. Вследствии собственного разнообразия и универсальности *Pantoea* применяются в различных областях биотехнологии, включая биоремедиацию гербицидов и других токсичных соединений [20].

Биотехнологический потенциал рода *Pantoea* распространяется также на его применение в качестве биоинокулянта и агента биологического контроля, обеспечивающего противодействие патогенам злаковых культур и стимуляцию врожденного иммунитета растений [25, 26]. Механизмы антагонистической активности представителей рода *Pantoea* включают прямой антагонизм, а также стимулирование индуцированной системной резистентности растений как независимо, так и синергически. В этих механизмах участвует множество секретируемых соединений: летучие органические соединения, антимикробные вещества, антибиотики, биосурфактанты, экзополисахариды, а также индукция системной устойчивости у растений [19, 27, 28]. Отдельные виды обладают способностью синтезировать фитогормоны [29]. Ряд исследований продемонстрировал выраженную антагонистическую активность *Pantoea* в отношении грибов рода *Fusarium*, являющихся одними из основных возбудителей фузариозов колоса и корневых гнилей [30–32]. Например, S. Xu *et al.* [31] обнаружили, что штамм *P. agglomerans* ZJU23 ингибировал рост фитопатогена *F. graminearum* за счет продуцирования гербики-

лина А, что подтверждает способность представителей рода *Pantoea* синтезировать вторичные метаболиты с выраженной антагонистической активностью в отношении фитопатогенов грибной природы. В работе [33] также показано, что штаммы *P. agglomerans* подавляли развитие *F. culmorum* и *F. avenaceum*, вызывающих заболевания зерновых культур

Летучие органические соединения, выделяемые *Pantoea* sp., способны ингибировать развитие таких фитопатогенов, как *Alternaria alternata*, *Septoria lycopersici* и *Corynespora cassiicola* [34]. Согласно литературным данным, наиболее выраженными антимикробными свойствами обладают 3-метилбутанол и 2-нонанол. Известно, что производные бензола, в частности *p*-ксилол, продуцируемые *Pantoea* sp. Dez632, снижали подвижность *Bacillus pumilus* – возбудителя гнили корней свеклы [35]. Аналогичным образом летучие органические соединения, продуцируемые несколькими штаммами *P. agglomerans*, проявляли прямой антагонизм в отношении *Monilia fructigena* и *M. laxa* [36].

Способность ингибировать развитие фитопатогенов сельскохозяйственных культур проявляли и другие представители рода *Pantoea* как в условиях *in vitro*, так и *in vivo*. Антимикробные соединения *P. ananatis* защищали плоды томатов от *Botrytis cinerea* [37], а также ингибировали развитие пирикулярноза, вызванного *Pyricularia oryzae* [38]. Данные характеристики подчеркивают потенциал *Pantoea* для устойчивого управления сельскохозяйственными культурами и обеспечения продовольственной безопасности.

Помимо антагонизма в отношении микромицетов, представители рода *Pantoea* проявляют активность против бактериальных фитопатогенов злаковых культур. Штаммы *P. agglomerans* ингибировали рост *Xanthomonas translucens* – возбудителя бактериальной полосатости листьев пшеницы – за счет продукции антимикробных метаболитов и сидерофоров [39]. Другие представители рода, в т. ч. *P. ananatis*, также демонстрируют антагонистическую активность в отношении *Xanthomonas* [40, 41].

Таким образом, накопленные данные свидетельствуют о том, что представители рода *Pantoea* являются антагонистами фитопатогенов сельскохозяйственных культур. Антагонистические свойства обусловлены подавлением роста патогенов в ризосфере и тканях растений. Кроме того, демонстрируется их способность ингибировать развитие грибов рода *Fusarium* и других фитопатогенов благодаря продуцированию антимикробных соединений.

Вместе с тем антагонистическая активность, наблюдаемая у представителей рода *Pantoea*, требует молекулярного обоснования. В этой связи особый интерес представляет анализ генных кластеров, ответственных за синтез вторичных метаболитов. Наличие соответствующих биосинтетических генных кластеров (NRPS, PKS, RiPPs и др.) определяет потенциал *Pantoea* как агентов биологической защиты. Геномный анализ

позволяет осуществлять целенаправленный поиск и отбор перспективных штаммов, способных синтезировать новые или малоизученные антимикробные соединения. Это создает теоретическую основу для разработки биопрепаратов на основе представителей рода *Pantoea*.

Цель исследования – провести полногеномный анализ и биоинформатическую характеристику клас-теров биосинтеза вторичных метаболитов штамма *Pantoea pleuroti* B-14756 для оценки его генетического и метаболического потенциала в качестве агента био-контроля фитопатогенов злаковых культур.

Объекты и методы исследования

В работе использовали штамм, выделенный на начальном этапе исследования, депонированный в Национальном биоресурсном центре Всероссийской коллекции промышленных микроорганизмов НИЦ «Курчатовский институт» (Москва, Россия) как *Pantoea pleuroti* под номером B-14756. Данный штамм образует круглые колонии желтого цвета диаметром в среднем 1 мм с приподнятым профилем, ровным краем и глянцевой фактурой. Клетки представляют собой грамотрицательные бациллы со средним размером (0,716×0,352 мкм). B-14756 ферментирует адонитол, L-пирролидонилариламидазу, β-галактозидазу, D-глюкозу, D-маннитол, D-маннозу, D-сорбит, сахарозу, D-трегалозу, малонат, 5-кето-D-глюконат, β-N-ацетилгалактозаминидазу, фосфатазу и кумарат. Штамм ингибирует рост *Fusarium graminearum* F-877 (диаметр зоны ингибирования составляет в среднем 62 мм), *Bipolaris sorokiniana* F-529 (80 мм), *Erwinia rhapontici* B-9292 (16 мм), *Xanthomonas campestris* B-4102 (25 мм). Кроме того, штамм продуцирует сидерофоры (53,1 %), синтезирует индолил-3-уксусную (5,64 мг/мл) и гиббереллиновую (284,3 мкг/мл) кислоты, а также кинетин (9,46 мкг/мл). *P. pleuroti* B-14756 фиксирует атмосферный азот (680 мкг/мл), солибилизирует фосфаты (102,3 мкг/мл), калий и цинк. Отмечена способность штамма образовывать биопленки [42]. Геномное секвенирование штамма *P. pleuroti* B-14756 было выполнено в Центре коллективного пользования «Геномика» (ИХБФМ СО РАН, Новосибирск, Россия).

Количество выделенной из бактериальных клеток ДНК с помощью набора ZymoBIOMICS DNA Miniprep Kit (Zymo Research, США) измеряли на спектрофотометре Nanodrop (Thermo Scientific, США) и флуориметре Qubit (Invitrogen, США) [43].

Для полногеномного секвенирования на платформе MGISEQ бактериальную ДНК подвергали фрагментации методом ультразвука на Covaris S2 (Covaris, США) с последующей обработкой РНКазой А (Thermo Scientific, США). Подготовку ДНК-библиотек осуществляли с использованием наборов NEBNext Ultra II DNA library prep kit (New England BioLabs, США) и NEBNext Multiplex Oligos (New England BioLabs, США) [44]. Полученное распределение длин фрагмен-

тов в диапазоне 200–700 п.н. соответствовало спецификациям платформы MGISEQ-2000. Качественный анализ библиотек проводили методом капиллярного электрофореза на Qsep100 (BiOptic, Тайвань) с помощью набор F3 Fast Cartridge (BiOptic, Тайвань), количественную оценку – флуориметрическим методом на Qubit (Invitrogen, США). После эквимольного объединения ДНК-библиотек секвенирование выполняли на системе MGISEQ-2000 (MGI Tech, Китай) с использованием реагентов DNBSEQ-G400RS High-throughput Sequencing Set (MGI Tech, Китай) с обеих сторон длиной 100 нуклеотидов согласно протоколу производителя.

Подготовку ДНК-библиотек для полногеномного секвенирования на платформе Polyseq осуществляли на основе выделенной бактериальной ДНК с использованием коммерческих наборов Barcode Library Preparation Kit и Ligation Barcode Kit (Polyseq Biotech, Китай). Полученные библиотеки смешивали в эквимольном соотношении. Секвенирование реализовывали на системе Polyseq One с применением проточных ячеек PolyseqCell Sequencing Chip (Polyseq Biotech, Китай).

При секвенировании на платформе MGISEQ-2000 получено 1,7 млн коротких прочтений общим объемом 170 Мб. Секвенирование на платформе Polyseq One обеспечило 166,4 тыс. длинных прочтений суммарным объемом 1753 Мб. Итоговый объем данных являлся достаточным для проведения *de novo* сборки генома *P. pleuroti* B-14756.

Для сборки *de novo* и функциональной аннотации генома первичную фильтрацию длинных прочтений, полученных на платформе Polyseq One, проводили с помощью программного обеспечения Filtlong v0.2.1¹. Для реконструкции геномной последовательности применяли сравнительный подход с использованием ассемблеров Flye v2.9.2 [45], Minipolish v0.1.3 [46] и Raven v1.8.1². Сборки подвергали кластеризации, выравниванию и генерации консенсусной последовательности с помощью инструмента Truicycler v0.5.4 [47]. Последующее исправление ошибок в геноме проводили в несколько этапов. Сначала использовали программу Medaka v1.7.2³, которая применяет длинные прочтения Polyseq One. Далее выполняли полировку с использованием коротких прочтений платформы MGISEQ путем последовательного применения алгоритмов Polypolish v0.5.0 [48] и POLCA v4.1.0 [49]. Подготовка коротких прочтений включала фильтрацию по качеству (QV > 20) и удаление адаптерных последовательностей в Cutadapt v5.0 [50], а также исправление ошибок секвенирования с помощью SPAdes v4.0.0 [51] в режиме --only-error-correction.

¹ Filtlong. URL: <https://github.com/rrwick/Filtlong> (дата обращения 02.02.2026).

² Raven. URL: <https://github.com/lbcb-sci/raven> (дата обращения 02.02.2026).

³ Medaka. URL: <https://github.com/nanoporetech/medaka> (дата обращения 02.02.2026).

Оценку полноты и достоверности полученной сборки генома проводили посредством анализа однокопийных ортологов с помощью инструмента BUSCO v5.5.0 [52]. Структурную и функциональную аннотацию генома осуществляли с использованием Bakta v1.11.4 [53], которая обеспечивает комплексную идентификацию генов и регуляторных элементов. Идентификацию таксономической принадлежности штамма на основе филогеномного анализа выполняли с помощью GTDB-tk v2.4.1 и базы данных GTDB r220.0 [54].

Результаты и их обсуждение

Полногеномное секвенирование – базовый этап исследования, позволяющий определить первичную нуклеотидную последовательность ДНК для последующего биоинформатического анализа. Данный подход обеспечивает идентификацию функциональных кластеров генов, выступающих генетическими факторами физиологических свойств микроорганизмов и их потенциала к синтезу вторичных метаболитов.

Спектрофотометрический анализ показал классический спектр поглощения ДНК (130 нг/мкл и 4,5 мкг), выделенной из *Pantoea pleuroti* B-14756, что говорит о достаточном качестве и количестве выделенной ДНК для создания из нее библиотек.

Критическим параметром, определяющим эффективность нанопорового секвенирования, является длина формируемых прочтений. Распределение длин нуклеотидных прочтений, полученных на платформе Polyseq one для *P. pleuroti* B-14756, представлено на рисунке 1. Доля прочтений, длина которых превышает 10 000 нт, составляет более трети от общего пула. Такая протяженность фрагментов, как правило, служит достаточным условием для успешной сборки кольцевой бактериальной хромосомы в процессе сборки *de novo*.

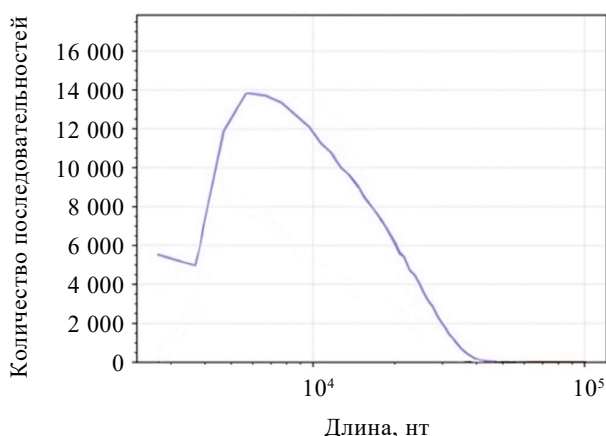


Рисунок 1. Распределение длин нуклеотидных прочтений для *Pantoea pleuroti* B-14756

Figure 1. Nucleotide reading lengths for *Pantoea pleuroti* B-14756

Полученные на платформе Polyseq One длинные прочтения подвергали фильтрации по качеству посредством инструмента Filtlong, после чего использовали для сборки генома *de novo* параллельно три программных алгоритма (ассемблера): Flye, Minipolish и Raven. Для верификации и консолидации результатов сборки задействовали TruSeq, в рамках которого полученные наборы контигов проходили процедуру кластеризации, множественного выравнивания и последующей генерации итоговой консенсусной последовательности генома.

Поскольку точность первичных данных, генерируемых на платформах секвенирования длинных фрагментов типа Polyseq, остается существенно ниже, чем у систем Illumina и MGI, процедура сборки включала этап двухстадийной полировки последовательности генома. Данная процедура направлена на исправление систематических ошибок и повышение итоговой точности сборки.

Первый этап полировки выполнялся на основе длинных прочтений Polyseq с использованием алгоритма Medaka. На втором этапе проводили гибридную коррекцию с помощью программных инструментов Polypolish и POLCA, использующих предварительно подготовленные на платформе MGISEQ прочтения. Подготовка прочтений на MGISEQ включала фильтрацию по порогу качества $Q > 30$ и одновременное удаление адаптерных последовательностей программой Cutadapt. Согласно полученным данным, доля прочтений с качеством выше $Q > 30$ составила более 70 % от общего объема данных. Геном до исправления ошибок составлял 4 734 187 п.н., после – 4 735 406 п.н. В результате исправления ошибок отредактировано более 1000 вариантов, при этом длина генома увеличилась на 1219 пар нуклеотидов.

Верификацию полноты и качества полученной геномной сборки проводили с использованием программного обеспечения BUSCO. В ходе анализа в геноме исследуемого штамма были идентифицированы все 124 целевых маркерных гена, характерных для данной таксономической группы. Стопроцентная представленность универсальных однокопийных ортологов свидетельствует о высокой степени полноты, структурной целостности и достоверности реконструированной последовательности генома. Далее провели аннотацию собранного генома с помощью программы Bakta. Значение GC-состава составило 53 %. Количество предсказанных кодирующих последовательностей (CDS) – 4416, кластеров рРНК – 7, а тРНК – 78.

Для оценки генетического потенциала штамма *P. pleuroti* B-14756 к продукции веществ, обладающих антагонистической активностью, провели поиск кластеров генов вторичных метаболитов с использованием платформы antiSMASH версии 8.0.4. Данная платформа является стандартным инструментом для высокоточной идентификации и функциональной аннотации кластеров в геномах бактерий и грибов. Анализ проводили

на основе геномной последовательности в формате GenBank [55]. Результаты идентификации кластеров представлены на рисунке 2 и в таблице 1.

В геноме *P. pleuroti* B-14756 идентифицированы кластеры генов, отвечающие за продукцию аэробактина, десферриоксамина Е и каротиноида. Аэробактин и десферриоксалин Е представляют собой сидерофоры, обеспечивающие эффективное хелатирование и транспорт ионов железа [56]. Каротиноид выполняет функцию антиоксиданта, защищая клеточные структуры от окислительного стресса и способствуя адаптации штамма к воздействию низких температур [57].

Нерибосомные пептид-синтетазы (NRPS) – мульти-модулярные ферменты или ферментные комплексы

бактерий и грибов, канализующие синтез важных пептидных продуктов из различных стандартных и непротеиногенных аминокислотных субстратов, которые обладают антибактериальной активностью (например циклоспорин, ванкомицин и даптомицин) [58, 59].

Нерибосомальные пептидсинтетазы и поликетид-синтетазы, присутствующие в бактериях и грибах, являются основными многомодульными ферментными комплексами, синтезирующими вторичные метаболиты, такие как фармакологически важные антибиотики и сидерофоры. Каждый из модулей NRPS активирует различные аминокислоты или арильные кислоты, после чего происходит их конденсация для синтеза линейного или циклического природного продукта [60].

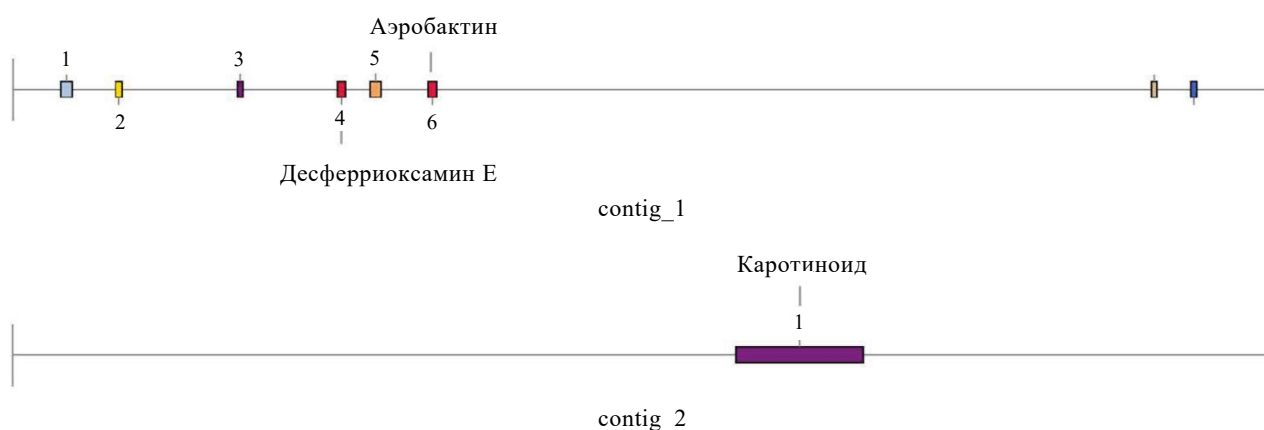


Рисунок 2. Кластеры генов биосинтеза вторичных метаболитов, идентифицированные в геноме *Pantoea pleuroti* B-14756

Figure 2. Gene clusters identified in *Pantoea pleuroti* B-14756

Таблица 1. Кластеры генов биосинтеза вторичных метаболитов, идентифицированные в геноме *Pantoea pleuroti* B-14756

Table 1. Clusters of genes responsible for biosynthesis of secondary metabolites identified in *Pantoea pleuroti* B-14756

Регион	Тип	Расположение на геноме, п.н.	Длина кластера, п.н.	Уровень сходства	Похожий известный кластер	Сравнение с базой MiBIG	Оценка сходства	Организм
contig_1								
1	NRPS-phosphonate	178861–221770	42910	–	–	BGC0001859.4	0,36	–
2	azole-containing RiPP	385334–411598	26265	–	–	BGC0001285.5	0,31	–
3	terpene-precursor	843533–864432	20900	–	–	BGC0001361.3	0,50	–
4	Nl-siderophore	1221400–1251751	30352	Высокий	Десферриоксалин Е	BGC0001572.3	0,85	<i>Pantoea agglomerans</i>
5	T3PKS	1343632–1384750	41119	–	–	BGC0001987.2	0,49	–
6	Nl-siderophore	1560968–1593373	32406	Высокий	Аэробактин	BGC0001499.5	0,90	<i>Pantoea ananatis</i>
7	hserlactone	4279712–4300344	20633	–	–	BGC0001928.2	0,46	–
8	redox-cofactor	4430571–4452736	22166	–	–	BGC0001440.5	0,41	–
contig_2								
1	terpene	146666–172427	25762	Высокий	Каротиноид	BGC0000638.3	0,89	<i>Pantoea ananatis</i>

Данные ферменты продуцируются некоторыми бактериями, например *Bacillus subtilis* и *Pseudomonas fluorescens*, и оказывают положительное влияние на биоконтроль болезней растений [61]. Андририд – антибиотик, продуцируемый *Pantoea*, представляет собой псевдопептид, синтезируемый посредством гибридного пути NRPS-PKS [62].

Некоторые молекулы нерибосомальных пептидов (NRP) обладают сильными антимикробными свойствами против бактериальных и грибковых патогенов растений и могут быть высокоспецифичными по своей активности, а также нацеленными на определенные виды или штаммы бактерий, что делает их многообещающей альтернативой антибиотикам широкого спектра действия, которые подвержены развитию антибиотикорезистентности [61].

Фосфонат – органофосфорное соединение, содержащее прямую углерод-фосфорную связь вместо более известной связи фосфатных эфиров [63]. Фосфонатно-связанный генный кластер PHN отвечает за высвобождение биологически доступного фосфата через бактериальное разложение фосфонатов. Штамм *P. agglomerans* P5 несет несколько генов *phn*, что свидетельствует о способности гидролизовать фосфонат до фосфата и алкана. Кроме того, геном данного штамма кодирует *phnA*, необходимый для деградации фосфоноацетата.

Фосфонатные соединения в бактериальных системах часто выполняют антибактериальную функцию либо участвуют в межмикробной конкуренции. В этом контексте потенциальное присутствие генных кластеров, отвечающих за синтез фосфоната, у штаммов *Pantoea* может рассматриваться как дополнительный фактор антагонистического потенциала.

Рибосомально синтезированные посттрансляционно модифицированные пептиды (RiPP) представляют собой быстро растущий класс природных соединений с разнообразной биологической активностью [64]. Линейные пептиды, содержащие азолины, составляют подкласс RiPP, демонстрирующих выдающееся разнообразие механизмов действия. В исследовании [64] сообщается об открытии фазолицина – рибосомально синтезируемого пептида, относящегося к классу линейных пептидов, содержащих азолины. Авторы предполагают, что узкоспектральная антибактериальная активность фазолицина против ризобий может служить отправной точкой для разработки средств биоконтроля, которые можно использовать, например для борьбы с патогенными штаммами *Agrobacterium* или с инокулянтами ризобия для бобовых культур, способными конкурировать с эндогенными штаммами *Rhizobium*. Фазолицин, активный против различных бактерий семейства *Rhizobiales*, включая несколько фитопатогенов, таких как *Agrobacterium tumefaciens* и *A. rhizogenes*, интересен не только своим своеобразным способом взаимодействия с рибосомой, но и как потенциальный агент биоконтроля в сельском хозяйстве.

В бактериях рода *Pantoea* обнаружены кластеры генов, детерминирующие синтез терпенов. Терпеноиды – наиболее распространенные вторичные метаболиты в растениях, насчитывающие примерно 25 000 соединений [65]. Структурно терпены состоят из одной или нескольких пятиуглеродных единиц и подразделяются на сесквитерпены, монотерпены, дитерпены, тритерпены, тетратерпены и политерпены в зависимости от количества пятиуглеродных единиц. Монотерпены и сесквитерпены являются важными компонентами летучих соединений, продуцируемых растениями, и играют значительную роль во взаимодействии и защитных реакциях между растениями, микроорганизмами и животными.

Терпеноиды важны для фотосинтеза растений, регулируя рост и развитие, опыление и устойчивость к внешним биотическим или абиотическим стрессам [66]. Например, тетратерпен-каротин способен поглощать и передавать световую энергию, а некоторые важные гормоны растений (абсцизовая кислота, брассинолид и гиббереллин) выступают производными терпенов, которые могут влиять на рост и развитие растений.

Геномный анализ представителей рода *Pantoea* свидетельствует о наличии функционирующих изопреноидных путей, обеспечивающих синтез терпеновых предшественников и производных соединений, имеющих адаптационное значение в фитобиоме. У ряда штаммов идентифицирован каротиноидный кластер (*crtE–crtB–crtI–crtY*), кодирующий ферменты биосинтеза С40-терпеноидов через образование гернилгернилпирофосфата. Функциональная значимость данного пути продемонстрирована на примере *Pantoea* sp. YR343: мутанты, дефектные по каротиноидному биосинтезу, характеризовались сниженной устойчивостью к окислительному стрессу, нарушением формирования биопленки и уменьшением эффективности колонизации корней растений, что подтверждает участие терпеноидных метаболитов в обеспечении экологической компетентности штамма в ризосфере [67]. Дополнительные данные, полученные при сравнительном протеомном анализе каротиноид-дефицитных мутантов, свидетельствуют об изменении мембранной организации и стресс-ответа, что указывает на системную роль изопреноидных соединений в поддержании клеточной стабильности [68].

Каротиноиды, как представители бактериальных терпеноидов, выполняют антиоксидантную функцию, ограничивая накопление активных форм кислорода, возникающих в зоне корневого контакта и при фитопатогенном воздействии. У *P. ananatis* показано, что каротиноидный путь ассоциирован с повышенной устойчивостью к токсифлавинолу, продуцируемому фитопатогенными микроорганизмами, что подтверждает участие терпеноидных соединений в конкурентной защите и стабилизации популяции бактерий в агроценозе [69]. Таким образом, терпеноидный метаболизм способствует поддержанию жизнеспособности

штаммов в условиях биотического стресса и опосредованно влияет на фитосанитарное состояние растений.

С учетом данных о роли бактериальных летучих органических соединений в индукции системной устойчивости растений и подавлении фитопатогенов [70, 71], наличие у представителей рода *Pantoea* генов изопреноидного биосинтеза и терпен-ассоциированных кластеров позволяет предположить возможность синтеза летучих терпеноидных метаболитов с регуляторной функцией. Несмотря на отсутствие полной структурной идентификации таких соединений у *Pantoea*, геномные и функциональные данные свидетельствуют о том, что терпеновые пути обеспечивают адаптационную устойчивость бактерий, способствуют их колонизационной активности и могут рассматриваться как дополнительный фактор биологической защиты растений.

Сидерофоры аэробактин и десферриоксаметин Е играют ключевую роль в конкурентных взаимодействиях микроорганизмов за счет своей способности к связыванию, хелатированию и последующему импорту ионов железа. Благодаря высокой связывающей способности к Fe^{3+} эти соединения позволяют некоторым бактериям эффективно захватывать железо из окружающей среды, создавая условия дефицита для других видов. Такой механизм выступает одним из универсальных способов микробного антагонизма, поскольку ограничение доступности железа приводит к замедлению роста или полной остановке жизнедеятельности чувствительных микроорганизмов [72, 73].

О. Choi et al. [74] установили, что мутантные штаммы *P. ananatis*, утратившие способность синтезировать аэробактин и десферриоксаметин Е, полностью теряют как синтез сидерофоров, так и способность подавлять рост чувствительных микроорганизмов. Авторы продемонстрировали, что оба сидерофора необходимы для проявления антагонистической активности. Такой результат служит прямым доказательством того, что связывание железа является механизмом антимикробного действия штаммов рода *Pantoea*. Похожие выводы отражены и в других исследованиях рода *Pantoea*. Так, в геномном анализе *P. vagans* показано, что десферриоксаметин Е служит основным гидроксаматным сидерофором данного вида и его наличие связано с конкурентоспособностью и потенциальной антагонистической активностью в растительных экосистемах [75].

Каротиноиды представляют собой важный компонент стратегии выживания и антагонизма микроорганизмов, т. к. они выполняют функцию мощных антиоксидантов [65], эффективно нейтрализуя реактивные формы кислорода и предотвращая перекисное окисление липидов мембран [76]. Благодаря способности стабилизировать клеточные мембраны каротиноиды повышают устойчивость бактерий к ультрафиолетовому излучению, низким температурам и химическим стрессорам, включая токсичные метаболиты и органические растворители [67, 77]. Поддержание целостности мембраны и защита от окислительного

повреждения позволяет клеткам сохранять метаболическую активность даже в неблагоприятных условиях, что, в свою очередь, обеспечивает возможность продолжать биосинтез антимикробных соединений, таких как сидерофоры и антибиотики. В совокупности это усиливает антагонистический потенциал микроорганизмов, делая их более конкурентоспособными в среде с ограниченными ресурсами [78].

Совокупность синтезируемых веществ – сидерофоров (аэробактина и десферриоксаметина Е) и каротиноидов – формирует комплексный механизм антимикробной активности. Он включает конкурентное вытеснение (за счет ограничения количества железа) и повышенную стрессоустойчивость (благодаря каротиноиду). Такое сочетание факторов делает штаммы рода *Pantoea* перспективными для биоконтроля и подавления фитопатогенных микроорганизмов.

Выводы

С целью оценки биологического потенциала представителя рода *Pantoea* в ходе работы проведен полногеномный анализ штамма *Pantoea pleuroti* В-14756 – перспективного агента биоконтроля злаковых культур. В результате поиска кластеров генов вторичных метаболитов установлено, что исследуемый штамм обладает способностью к продуцированию веществ с антагонистической активностью, в частности сидерофоров (аэробактина и десферриоксаметина Е) и каротиноидов. Выявленные биосинтетические кластеры вторичных метаболитов, включая NRPS-, RiPP-, фосфонатные и терпеновые пути, свидетельствуют о значительном антагонистическом потенциале *P. pleuroti* В-14756. Наличие генов, ассоциированных с синтезом антимикробных соединений, указывает на перспективность использования данного штамма в качестве агентов биологического контроля фитопатогенов. Таким образом, эффективное использование представителей рода *Pantoea* возможно только при условии комплексного молекулярно-генетического и функционального скрининга.

Критерии авторства

Авторы в равной степени участвовали в подготовке и написании статьи.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution

All the authors contributed equally to the study and bear equal responsibility for information published in this article.

Conflict of interest

The authors declared no conflict of interest regarding the publication of this article.

Список литературы / References

1. Shah F, Wu W. Soil and crop management strategies to ensure higher crop productivity within sustainable environments. *Sustainability*. 2019;11(5):1485. <https://doi.org/10.3390/su11051485>
2. Prosekov AYU. Food security and globalization. *Foods and Raw Materials*. 2026;14(2):247–251. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2026-2-679>
3. Giraldo P, Benavente E, Manzano-Agugliaro F, Gimenez E. Worldwide research trends on wheat and barley: A bibliometric comparative analysis. *Agronomy*. 2019;9(7):352. <https://doi.org/10.3390/agronomy9070352>
4. Shewry PR, Hey SJ. The contribution of wheat to human diet and health. *Food and Energy Security*. 2015;4(3):178–202. <https://doi.org/10.1002/fes3.64>
5. Fotina NV, Serazetdinova YuR, Kolpakova DE, Asyakina LK, Atuchin VV, *et al.* Enhancement of wheat growth by plant growth-stimulating bacteria during phytopathogenic inhibition. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*. 2024;60:103294. <https://doi.org/10.1016/j.beab.2024.103294>
6. Myers SS, Smith MR, Guth S, Golden CD, Vaitla B, *et al.* Climate change and global food systems: Potential impacts on food security and undernutrition. *The Annual Review of Public Health*. 2017;38:259–277. <https://doi.org/10.1146/annurev-publhealth-031816-044356>
7. Said M. An overview of impact of agrochemicals on human health and natural environment. *Scientific Research Communications*. 2023;3(2). <https://doi.org/10.52460/src.2023.009>
8. Serazetdinova YuR, Chekushkina DYU, Borodina EE, Kolpakova DE, Minina VI, *et al.* Synergistic interaction between *Azotobacter* and *Pseudomonas* bacteria in a growth-stimulating consortium. *Foods and Raw Materials*. 2025;13(2):376–393. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2025-2-651>
9. Carvalho FP. Pesticides, environment, and food safety. *Food and Energy Security*. 2017;6(2):48–60 <https://doi.org/10.1002/fes3.108>
10. Gomiero T. Soil degradation, land scarcity and food security: Reviewing a complex challenge. *Sustainability*. 2016;8(3):281. <https://doi.org/10.3390/su8030281>
11. Faskhutdinova ER, Fotina NV, Neverova OA, Golubtsova YuV, Mudgal G, *et al.* Extremophilic bacteria as biofertilizer for agricultural wheat. *Foods and Raw Materials*. 2024;12(2):348–360. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2024-2-613>
12. Țopa D-C, Căpșună S, Calistru A-E, Ailincăi C. Sustainable practices for enhancing soil health and crop quality in modern agriculture: A review. *Agriculture*. 2025;15(9):998. <https://doi.org/10.3390/agriculture15090998>
13. Elnahal ASM, El-Saadony MT, Saad AM, Desoky EM, El-Tahan AM, *et al.* The use of microbial inoculants for biological control, plant growth promotion, and sustainable agriculture: A review. *European Journal of Plant Pathology*. 2022;162:759–792. <https://doi.org/10.1007/s10658-021-02393-7>
14. Асякина Л. К., Mudgal G., Тихонов С. Л., Ларичев Т. А., Фотина Н. В. и др. Исследование потенциала естественной микробиоты яровой мягкой пшеницы в повышении урожайности. Достижения науки и техники АПК. 2023. Т. 37. № 11. С. 12–17. [Asyakina LK, Mudgal G, Tikhonov SL, Larichev TA, Fotina NV, *et al.* Study of the potential of natural microbiota of spring soft wheat to increase yield. *Achievements of Science and Technology of Agriculture*. 2023;37(11):12–17. (In Russ.)] https://doi.org/10.53859/02352451_2023_37_11_12
15. Асякина Л. К., Исачкова О. А., Колпакова Д. Е., Бородин Е. Е., Богер В. Ю. и др. Влияние микробного консорциума на рост и развитие ярового ячменя в условиях Кемеровской области – Кузбасса. Зерновое хозяйство России. 2024. Т. 16. № 1. С. 104–112. [Asyakina LK, Isachkova OA, Kolpakova DE, Borodina EE, Boger VYu, *et al.* The effect of a microbial consortium on spring barley growth and development in The Kemerovo Region, Kuzbass. 2024;16(1):101–112. (In Russ.)] <https://doi.org/10.31367/2079-8725-2024-90-1-104-112>
16. Фасхутдинова Е. Р., Богачева Н. Н., Позднякова А. В., Бородин Е. Е., Лузянин С. Л. Применение эндофитных микроорганизмов для интенсификации ростовых процессов сельскохозяйственных культур. Техника и технология пищевых производств. 2024. Т. 54. № 4. С. 820–836. [Faskhutdinova ER, Bogacheva NN, Borodina EE, Pozdnyakova AV, Luzyanin SL. Effect of endophytic microorganisms on growth rate of crops. *Food Processing: Techniques and Technology*. 2024;54(4):820–836. (In Russ.)] <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-4-2548>
17. Serazetdinova YuR, Borodina EE, Fotina NV, Naik A, Mudgal G, *et al.* Rhizobia as complex biofertilizers for wheat: Biological nitrogen fixation and plant growth promotion. *Foods and Raw Materials*. 2026;14(1):214–227. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2026-1-669>
18. Serazetdinova YuR, Kolpakova DE, Borodina EE, Asyakina LK, Prosekov AYU, *et al.* Sinorhizobium and sustainable farming: Genomic approaches. *Foods and Raw Materials*. 2027;15(1):238–256. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2027-1-705>
19. Duchateau S, Crouzet J, Dorey S, Aziz A. The plant-associated *Pantoea* spp. as biocontrol agents: Mechanisms and diversity of bacteria-produced metabolites as a prospective tool for plant protection. *Biological Control*. 2024;188:105441. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2024.105441>
20. Серазетдинова Ю. Р., Колпакова Д. Е., Бородин Е. Е., Плешивцев И. И., Гордиенко А. В. и др. Биологический контроль заболеваний злаковых культур с применением бактерий рода *Pantoea*. Биосфера. 2025. Т. 17. № 3. С. 153–174.

- [Serazetdinova YuR, Kolpakova DE, Borodina EE, Pleshivtsev II, Gordienko AV, et al. Biological control of cereal crop diseases using bacteria of the genus *Pantoea*. Biosfera. 2025;17(3):153–174. (In Russ.)] <https://doi.org/10.24855/biosfera.v17i3.1006>
21. Ercole TG, Liviero R, Terra LA, Zocolo GJ, Klepa MS, et al. Integrated genome mining and phytohormone profiling of six plant growth-promoting elite bacterial strains. Archives of Microbiology. 2026;208(3):152. <https://doi.org/10.1007/s00203-025-04712-6>
 22. Walterson AM, Stavrinos J. *Pantoea*: Insights into a highly versatile and diverse genus within the *Enterobacteriaceae*. FEMS Microbiology Reviews. 2015;39(6):968–984. <https://doi.org/10.1093/femsre/fuv027>
 23. Timofeeva AM, Galyamova MR, Sedykh SE. Plant growth-promoting soil bacteria: Nitrogen fixation, phosphate solubilization, siderophore production, and other biological activities. Plants. 2023;12(24):4074. <https://doi.org/10.3390/plants12244074>
 24. Suleimanova AD, Sokolnikova LV, Egorova EA, Berkutova ES, Pudova DS, et al. Antifungal activity of siderophore isolated from *Pantoea brenneri* against *Fusarium oxysporum*. Russian Journal of Plant Physiology. 2023;70(8):199. <https://doi.org/10.1134/s1021443723602744>
 25. Şimşek Ö, Isak MA, Dönmez D, Şekerci AD, İzgü T, et al. Advanced biotechnological interventions in mitigating drought stress in plants. Plants. 2024;13(5):717. <https://doi.org/10.3390/plants13050717>
 26. Valbuena-Rodríguez JL, Fonseca IR, Buitrago-Yomayusa C, Puentes-S A, Benavides ME. Isolation and characterization of *Pantoea ananatis* and *P. agglomerans* in quinoa: *P. ananatis* as a potential fungal biocontroller and plant growth promoter. International Microbiology. 2025;28(6):1149–1161. <https://doi.org/10.1007/s10123-024-00608-5>
 27. Boro M, Sannyasi S, Chettri D, Verma AK. Microorganisms in biological control strategies to manage microbial plant pathogens: A review. Archives of Microbiology. 2022;204(11):666. <https://doi.org/10.1007/s00203-022-03279-w>
 28. Mehan Llontop ME, Hurley K, Tian L, Bernal Galeano VA, Wildschutte H, et al. Exploring rain as source of biological control agents for fire blight on apple. Frontiers in Microbiology. 2020;11:199. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.00199>
 29. Itkina DL, Suleimanova AD, Sharipova MR. Isolation, purification, and identification of the secretion compound *Pantoea brenneri* AS3 with fungicidal activity. Applied Biochemistry and Microbiology. 2022;58:456–462. <https://doi.org/10.1134/S000368382204007X>
 30. Melini F, Luziatelli F, Bonini P, Ficca AG, Melini V, et al. Optimization of the growth conditions through response surface methodology and metabolomics for maximizing the auxin production by *Pantoea agglomerans* C1. Frontiers in Microbiology. 2023;14:1022248. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1022248>
 31. Xu S, Liu YX, Cernava T, Wang H, Zhou Y, et al. *Fusarium* fruiting body microbiome member *Pantoea agglomerans* inhibits fungal pathogenesis by targeting lipid rafts. Nature Microbiology. 2022;7(6):831–843. <https://doi.org/10.1038/s41564-022-01131-x>
 32. Quartana C, Faddetta T, Anello L, Di Bernardo M, Petralia R, et al. Activity of bacterial seed endophytes of landrace durum wheat for control of *Fusarium* foot rot. Phytopathologia Mediterranea. 2022;61(1):95–106. <https://doi.org/10.36253/phyto-12993>
 33. Dutkiewicz J, Mackiewicz B, Lemieszek MK, Golec M, Milanowski J. *Pantoea agglomerans*: A mysterious bacterium of evil and good. Part IV. Beneficial effects. Annals of Agricultural and Environmental Medicine. 2016;23(2):206–222. <https://doi.org/10.5604/12321966.1203879>
 34. López SMY, Pastorino GN, Balatti PA. Volatile organic compounds profile synthesized and released by endophytes of tomato (*Solanum lycopersici* L.) and their antagonistic role. Archives of Microbiology. 2021;203:1383–1397. <https://doi.org/10.1007/s00203-020-02136-y>
 35. Safara S, Harighi B, Bahramnejad B, Ahmadi S. Antibacterial activity of endophytic bacteria against sugar beet root rot agent by volatile organic compound production and induction of systemic resistance. Frontiers in Microbiology. 2022;13:921762. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.921762>
 36. Lahlali R, Aksissou W, Lyousfi N, Ezrari S, Blenzar A, et al. Biocontrol activity and putative mechanism of *Bacillus amyloliquefaciens* (SF14 and SP10), *Alcaligenes faecalis* ACBC1, and *Pantoea agglomerans* ACBP1 against brown rot disease of fruit. Microbial Pathogenesis. 2020;139:103914. <https://doi.org/10.1016/j.micpath.2019.103914>
 37. Enya J, Shinohara H, Yoshida S, Tsukiboshi T, Negishi H, et al. Culturable leaf-associated bacteria on tomato plants and their potential as biological control agents. Microbial Ecology. 2007;53:524–436. <https://doi.org/10.1007/s00248-006-9085-1>
 38. Simeya N, Numata S, Nakjima M, Haseba A, Hibi T, et al. Biological control of rice blast by the epiphytic bacterium *Erwinia ananas* transformed with a chitinolytic enzyme gene from an antagonistic bacterium, *Serratia marcescens* strain B2. Journal of General Plant Pathology. 2003;69:276–282. <https://doi.org/10.1007/s10327-003-0043-1>
 39. Stromberg KD, Kinkel LL, Leonard KJ. Quantifying the effect of bacterial antagonists on the relationship between phyllosphere population sizes of *Xanthomonas translucens* pv. *translucens* and subsequent bacterial leaf streak severity on wheat seedlings. Biological Control. 2004;29(1):58–65. [https://doi.org/10.1016/S1049-9644\(03\)00126-9](https://doi.org/10.1016/S1049-9644(03)00126-9)
 40. Tian Y, Lei W, Zhang J, Shen Y, Lu J, et al. Mechanism of *Pantoea ananatis* in the biocontrol of rice bacterial leaf blight. Frontiers in Microbiology. 2026;17:1722838. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2026.1722838>

41. Sun W, Liu Q, Chen H, Xie X, Zhang Z, *et al.* Rice phyllospheric *Pantoea* spp. suppress blast and bacterial blight diseases. *Environ Microbiome*. 2025;20(1):137. <https://doi.org/10.1186/s40793-025-00799-y>
42. Бородина Е. Е., Гордиенко А. В., Плешивцев И. И., Фотина Н. В., Федорова А. М. и др. Биологический потенциал нового бактериального штамма рода *Pantoea* в защите от биотического стресса и стимуляции роста зерновых культур. *Техника и технология пищевых производств*. 2025. Т. 55. № 4. С. 710–722. [Borodina EE, Gordienko AV, Pleshivtsev II, Fotina NV, Fedorova AM, *et al.* New *Pantoea* strain as antistress agent and growth stimulator in grain growing. *Food Processing: Techniques and Technology*. 2025;55(4):710–722. (In Russ.)] <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2025-4-2606>
43. Наумова Н. Б., Батурина О. А., Локтева А. С., Плешакова В. И., Лещева Н. А. и др. Влияние декстрана на бактериобиом кишечника телят. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*. 2023. Т. 15. № 6. С. 197–221. [Naumova NB, Baturina OA, Lokteva AS, Pleshakova VI, Lescheva NA, *et al.* The effect of dextran on the gut bacteriobiome of calves. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*. 2023;15(6):197–221. (In Russ.)] <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2023-15-6-956>
44. Андреева И. С., Тотменина О. Д., Кабанов А. С., Антонен М. Е., Боднев С. А. и др. Оценка патогенного потенциала микроорганизмов атмосферных аэрозолей г. Новосибирска и пригорода. Здоровье населения и среда обитания. 2024. Т. 32. № 4. С. 27–36. [Andreeva IS, Totmenina OD, Kabanov AS, Antonets ME, Bodnev SA, *et al.* Assessment of the pathogenic potential of microorganisms in atmospheric aerosols of Novosibirsk and its suburbs. *Public Health and Life Environment*. 2024;32(4):27–36. (In Russ.)] <https://doi.org/10.35627/2219-5238/2024-32-4-27-36>
45. Kolmogorov M, Yuan J, Lin Y, Pevzner P. Assembly of long error-prone reads using repeat graphs. *Nature Biotechnology*. 2019;37:540–546. <https://doi.org/10.1038/s41587-019-0072-8>
46. Wick RR, Holt KE. Benchmarking of long-read assemblers for prokaryote whole genome sequencing. *F1000Research*. 2019;8:2138. <https://doi.org/10.12688/f1000research.21782.4>
47. Wick RR, Judd LM, Cerdeira LT, Hawkey J, Méric G, *et al.* Tricycler: Consensus long-read assemblies for bacterial genomes. *Genome Biology*. 2021;22:266. <https://doi.org/10.1186/s13059-021-02483-z>
48. Wick RR, Holt KE. Polypolish: Short-read polishing of long-read bacterial genome. *PLOS Computational Biology*. 2022;18(1):e1009802. <https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1009802>
49. Zimin AV, Salzberg SL. The genome polishing tool POLCA makes fast and accurate corrections in genome assemblies. *PLOS Computational Biology*. 2020;16(6):e1007981. <https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1007981>
50. Marcel M. Cutadapt removes adapter sequences from high-throughput sequencing reads. *EMBnetjournal*. 2011;17(1):10. <https://doi.org/10.14806/ej.17.1.200>
51. Bankevich A, Nurk S, Antipov D, Gurevich AA, Dvorkin M, *et al.* SPAdes: A new genome assembly algorithm and its applications to single-cell sequencing. *Journal of Computational Biology*. 2012;19(5):455–477. <https://doi.org/10.1089/cmb.2012.0021>
52. Manni M, Berkeley MR, Seppey M, Zdobnov EM. BUSCO: Assessing genomic data quality and beyond. *Current Protocols*. 2021;1:e323. <https://doi.org/10.1002/cpz1.323>
53. Schwengers O, Jelonek L, Dieckmann MA, Beyvers S, Blom J, *et al.* Bakta: Rapid and standardized annotation of bacterial genomes via alignment-free sequence identification. *Microbial Genomics*. 2021;7(11):000685. <https://doi.org/10.1099/mgen.0.000685>
54. Chaumeil PA, Mussig AJ, Hugenholtz P, Parks DH. GTDB-Tk: A toolkit to classify genomes with the genome taxonomy database. *Bioinformatics*. 2019;36:1925–1927. <https://doi.org/10.1093/bioinformatics/btz848>
55. Blin K, Shaw S, Vader L, Szenei J, Reitz ZL, *et al.* antiSMASH 8.0: Extended gene cluster detection capabilities and analyses of chemistry, enzymology, and regulation. *Nucleic Acids Research*. 2025;53:32–38. <https://doi.org/10.1093/nar/gkaf334>
56. Konopka K, Bindereif A, Neilands JB. Aerobactin-mediated utilization of transferrin iron. *Biochemistry*. 1982;21(25):6503–6508. <https://doi.org/10.1021/bi00268a028>
57. Seel W, Baust D, Sons D, Albers M, Etzbach L, *et al.* Carotenoids are used as regulators for membrane fluidity by *Staphylococcus xylosus*. *Scientific Reports*. 2020;10(1):330. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-57006-5>
58. Bozhüyük KAJ, Fleischhacker F, Linck A, Wesche F, Tietze A, *et al.* De novo design and engineering of non-ribosomal peptide synthetases. *Nature Chemistry*. 2018;10:275–281. <https://doi.org/10.1038/nchem.2890>
59. Miller BR, Gulick AM. Structural biology of nonribosomal peptide synthetases. *Methods in Molecular Biology*. 2016;1401:3–29. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-3375-4_1
60. Singh M, Chaudhary S, Sareen D. Non-ribosomal peptide synthetases: Identifying the cryptic gene clusters and decoding the natural product. *Journal of Biosciences*. 2017;42:175–187. <https://doi.org/10.1007/s12038-017-9663-z>
61. Ranjan A, Rajput VD, Prazdnova EV, Gurnani M, Bhardwaj P, *et al.* Nature's antimicrobial arsenal: Non-ribosomal peptides from PGPB for plant pathogen biocontrol. *Fermentation*. 2023;9(7):597. <https://doi.org/10.3390/fermentation9070597>
62. Jin M, Fischbach MA, Clardy J. A biosynthetic gene cluster for the acetyl-CoA carboxylase inhibitor andrimid. *Journal of the American Chemical Society*. 2006;128:10660–10661. <https://doi.org/10.1021/ja063194c>

63. Shariati VJ, Malboobi MA, Tabrizi Z, Tavakol E, Owlia P, et al. Comprehensive genomic analysis of a plant growth-promoting rhizobacterium *Pantoea agglomerans* strain P5. Scientific Reports. 2017;7:15610. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-15820-9>
64. Travin DY, Watson ZL, Metev M, Ward FR, Osterman IA, et al. Structure of ribosome-bound azole-modified peptide phazolicin rationalizes its species-specific mode of bacterial translation inhibition. Nature Communications. 2019;10(1):4563. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-12589-5>
65. Li C, Zha W, Li W, Wang J, You A. Advances in the biosynthesis of terpenoids and their ecological functions in plant resistance. International Journal of Molecular Sciences. 2023;24(14):11561. <https://doi.org/10.3390/ijms241411561>
66. Loreto F, Dicke M, Schnitzler J, Turlings T. Plant volatiles and the environment. Plant Cell & Environment. 2014;37:1905–1908. <https://doi.org/10.1111/pce.12369>
67. Bible AN, Fletcher SJ, Pelletier DA, Schadt CW, Jawdy SS, et al. A carotenoid-deficient mutant in *Pantoea* sp. YR343, a bacteria isolated from the rhizosphere of *Populus deltoides*, is defective in root colonization. Frontiers in Microbiology. 2016;7:491. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.00491>
68. Kumar SV, Abraham PE, Hurs GB, Chourey K, Bible AN, et al. A carotenoid-deficient mutant of the plant-associated microbe *Pantoea* sp. YR343 displays an altered membrane proteome. Scientific Reports. 2020;10(1):14985. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-71672-w>
69. Choi O, Kang B, Lee Y, Lee Y, Kim J. *Pantoea ananatis* carotenoid production confers toxoflavin tolerance and is regulated by Hfq-controlled quorum sensing. MicrobiologyOpen. 2021;10(1):e1143. <https://doi.org/10.1002/mbo3.1143>
70. Brilli F, Loreto F, Baccelli I. Exploiting plant volatile organic compounds (VOCs) in agriculture to improve sustainable defense strategies and productivity of crops. Frontiers in Plant Science. 2019;10:264. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00264>
71. Montejano-Ramírez V, Ávila-Oviedo JL, Campos-Mendoza FJ, Valencia-Cantero E. Microbial volatile organic compounds: Insights into plant defense. Plants. 2024;13(15):2013. <https://doi.org/10.3390/plants13152013>
72. Wilson BR, Bogdan AR, Miyazawa M, Hashimoto K, Tsuji Y. Siderophores in iron metabolism: From mechanism to therapy potential. Trends in Molecular Medicine. 2016;22(12):1077–1090. <https://doi.org/10.1016/j.molmed.2016.10.005>
73. Timofeeva AM, Galyamova MR, Sedykh SE. Bacterial siderophores: Classification, biosynthesis, perspectives of use in agriculture. Plants. 2022;11:3065. <https://doi.org/10.3390/plants11223065>
74. Choi O, Cho J, Kang B, Lee Y, Kim J. Negatively regulated Aerobactin and Desferrioxamine E by fur in *Pantoea ananatis* are required for full siderophore production and antibacterial activity, but not for virulence. Applied and Environmental Microbiology. 2022;88:e02405–21. <https://doi.org/10.1128/aem.02405-21>
75. Smits THM, Rezzonico F, Kamber T, Blom J, Goesmann A, et al. Metabolic versatility and antibacterial metabolite biosynthesis are distinguishing genomic features of the fire blight antagonist *Pantoea vagans* C9-1. PLOS ONE. 2011;6(7):e22247. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0022247>
76. Sandmann G. Antioxidant protection from UV- and light-stress related to carotenoid structures. Antioxidants. 2019;8:219. <https://doi.org/10.3390/antiox8070219>
77. Chia GWN, Seviour T, Kjelleberg S, Hinks J. Carotenoids improve bacterial tolerance towards biobutanol through membrane stabilization. Environmental Science: Nano. 2021;8:328–341. <https://doi.org/10.1039/D0EN00983K>
78. López GD, Álvarez-Rivera G, Carazzone C, Ibáñez E, Leidy C, et al. Bacterial carotenoids: Extraction, characterization, and applications. Critical Reviews in Analytical Chemistry. 2023;53(6):1239–1262. <https://doi.org/10.1080/10408347.2021.2016366>

Дополнительная информация об авторах / Additional information about the authors

Серазетдинова Юлия Ренатовна / Yuliya R. Serazetdinova ORCID 0000-0002-3044-3529; eLIBRARY SPIN 4510-4135
 Фотина Наталья Вячеславовна / Natalya V. Fotina ORCID 0000-0002-7655-0258; eLIBRARY SPIN 5500-7190
 Тупикин Алексей Евгеньевич / Alexey E. Tupikin ORCID 0000-0002-8194-0322; eLIBRARY SPIN 7084-4313
 Любимова Надежда Александровна / Nadezhda A. Lyubimova eLIBRARY SPIN 1221-1854
 Асякина Людмила Константиновна / Lyudmila K. Asyakina ORCID 0000-0003-4988-8197; eLIBRARY SPIN 4479-3384

<https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-2-2633>
<https://elibrary.ru/YLIPNL>

Оригинальная статья
<https://fptt.ru>

Оптимизация щелочной экстракции и изоэлектрического осаждения белка конопли для использования в пищевой промышленности



Д. И. Алексаночкин^{1,*}, И. А. Фоменко¹, И. А. Детинкин¹,
И. М. Чернуха^{1,2}, Н. Г. Машенцева¹

¹ Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ), Москва, Россия

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

Поступила в редакцию: 24.09.2025

Принята после рецензирования: 25.11.2025

Принята к публикации: 10.03.2026

*e-mail: aleksanochkindi@list.ru

© Д. И. Алексаночкин, И. А. Фоменко, И. А. Детинкин,
И. М. Чернуха, Н. Г. Машенцева, 2026



Аннотация.

Растущий интерес к растительным белкам как к экологичной и эффективной альтернативе животным белкам обусловил появление новых продуктов на рынке, в т. ч. изолята белка конопли. Ключевым этапом в технологии получения белковых препаратов из растительного сырья является щелочная экстракция (pH 6,0–12,0) с последующим изоэлектрическим осаждением. Цель исследования – изучить влияние параметров экстракции и изоэлектрического осаждения (с расчетом теоретической и экспериментальной изоэлектрической точки) на выход белка из гидролизованного жмыха конопли и определить условия максимизации.

Объект исследования – жмых конопли сорта Вера. Для оптимизации параметров экстракции (pH, температура, продолжительность) был использован трехфакторный план Бокса-Бенкена (15 экспериментальных точек).

Установлено, что добавление хлорида натрия снижает эффективность экстракции на 6,8–13,5 % по сравнению с щелочным методом. Оптимальная чистота белка (92,6–93,1 %) достигается при изоэлектрическом осаждении в диапазоне pH 4,4–4,6, что не соответствует теоретической изоэлектрической точке (6,95–7,22). Анализ белкового профиля выделенной фракции выявил преобладание эдестина (~ 38 кДа) и альбумина (~ 21 кДа). Полученный изолят белка конопли содержит от 89,53 до 92,28 % белка (по методу Барнштейна и Кьельдаля соответственно), что свидетельствует о высоком качестве продукта. Регрессионная модель адекватно описывает технологический процесс ($R^2 = 0,983$) с оптимальными условиями экстракции – pH 11,2, температура 52 °C и длительность 3 ч.

Использование щелочного экстрагирования с последующим осаждением белка в его изоэлектрической точке позволяет эффективно выделять белок с выходом до 80 % относительно его количества в сырье, содержащем $34,32 \pm 3,43$ % сырого протеина.

Ключевые слова. Промышленная конопля, экстракция белка, изоэлектрическая точка, изолят белка, оптимизация, математическая модель, степень экстракции, профиль белка конопли, биоинформатика

Финансирование. Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда (проект № 25-16-00178).

Для цитирования: Алексаночкин Д. И., Фоменко И. А., Детинкин И. А., Чернуха И. М., Машенцева Н. Г. Оптимизация щелочной экстракции и изоэлектрического осаждения белка конопли для использования в пищевой промышленности. Техника и технология пищевых производств. 2026. Т. 56. № 2. С. 247–259. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-2-2633>

Hemp Protein in the Food Industry: Optimizing Alkaline Extraction and Isoelectric Precipitation



Denis I. Aleksanochkin^{1,*}, Ivan A. Fomenko¹, Ilya A. Detinkin¹,
Irina M. Chernukha^{1,2}, Natalia G. Mashentseva¹

¹ Russian Biotechnological University (ROSBIOTECH), Moscow, Russia

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

Received: 24.09.2025

Revised: 25.11.2025

Accepted: 10.03.2026

*e-mail: aleksanochkindi@list.ru

© D.I. Aleksanochkin, I.A. Fomenko, I.A. Detinkin, I.M. Chernukha,
N.G. Mashentseva, 2026



Abstract.

Plant proteins and their products, e.g., hemp protein isolate, offer a sustainable and effective alternative to animal proteins. Protein preparations are obtained from plant materials by alkaline extraction (pH 6.0–12.0) followed by isoelectric precipitation. This article describes the effect of extraction and isoelectric precipitation parameters on protein yield from hydrolyzed hemp cake. Calculating the theoretical and experimental isoelectric point made it possible to improve the procedure and increase the yield. The study featured hemp cake of the Vera variety. A three-factor Box–Behnken design (15 experimental points) optimized the extraction parameters of pH, temperature, and time.

The resulting regression model adequately described the process ($R^2 = 0.983$) with the optimal extraction conditions as pH 11.2; 52°C; 3 h. Sodium chloride reduced extraction efficiency by 6.8–13.5% compared to the alkaline method. The optimal protein purity (92.6–93.1%) was achieved with isoelectric precipitation in the pH range of 4.4–4.6, which did not correspond to the modeled isoelectric point (6.95–7.22). The protein profile analysis of the isolated fraction demonstrated the predominance of edestin (~38 kDa) and albumin (~21 kDa). The resulting hemp protein isolate contained 89.53 to 92.28% protein, according to the Barnstein and Kjeldahl methods, respectively, which indicated a high-quality product.

The use of alkaline extraction followed by protein precipitation in isoelectric point provided efficient protein isolation with a yield reaching 80% relative to its content in the raw material, containing $34.32 \pm 3.43\%$ crude protein.

Keywords. Industrial hemp, protein extraction, isoelectric point, protein isolate, optimization, mathematical model, extraction degree, hemp protein profile, bioinformatics

Funding. The research was supported by the Russian Science Foundation, Project no. 25-16-00178.

For citation: Aleksanochkin DI, Fomenko IA, Detinkin IA, Chernukha IM, Mashentseva NG. Hemp Protein in the Food Industry: Optimizing Alkaline Extraction and Isoelectric Precipitation. Food Processing: Techniques and Technology. 2026;56(2):247–259. (In Russ.) <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-2-2633>

Введение

В последнее время внимание к растительным белковым ингредиентам и обогащенным ими продуктам питания заметно возросло вследствие усиления тренда на здоровый образ жизни и распространения вегетарианства [1]. Ожидается, что новые виды растительных белков, получаемые из доступного сырья (например семян) или из побочных продуктов пищевых производств и вторичных сырьевых ресурсов (жмыхов и шротов масличных культур), станут альтернативой белкам животного происхождения. Это связано с более высокой эффективностью их производства, меньшим воздействием на окружающую среду, а также способностью соответствовать диетическим и культурным предпочтениям потребителей [2, 3].

Промышленная конопля – богатый источник микро- и макроэлементов. В составе нативного семени содержится 30 % белка, удаление матрикса позволяет повысить этот показатель [4, 5]. В настоящее время на рынке представлен широкий ассортимент продукции из конопляных семян: цельные и очищенные семена, масло, жмых и шрот (побочные продукты маслоэкстракционного производства, получаемые прессованием и экстракцией соответственно), а также различные белковые препараты [6]. В связи с этим существует значительный потенциал использования продуктов из конопли в различных отраслях пищевой индустрии, поэтому разработка конопляных продуктов с прогнозируемым составом и желаемыми технологическими свойствами является актуальной [7].

Изолят белка конопли представляет собой перспективный продукт, позволяющий в большой мере удовлетворить потребности современного потребителя [8]. Аминокислотный состав белка, согласно опубликованным данным, соответствует рекомендациям ФАО/ВОЗ [9]. На сегодняшний день активно ведутся исследования по изучению и улучшению функционально-технологических и антиоксидантных свойств этого продукта [10, 11]. Тем не менее, многие вопросы остаются недостаточно изученными, что подчеркивает актуальность исследований по получению и изучению белковых продуктов из конопли. На рисунке 1 представлена типовая схема получения изолята белка из растительного сырья.

Щелочная экстракция белка выступает самым распространенным методом выделения белковой фракции из нативной структуры растительного матрикса. Для большинства растительных субстратов этот процесс проводится в широком диапазоне pH от 6,0 до 12,0 с последующим изоэлектрическим осаждением при pH 4,5–5,5. Именно при высоких значениях pH наблюдается максимальная экстракция белковых веществ [12]. pH является ключевым фактором, влияющим на эффективность экстракции белков из конопли. В кислой среде (pH от 2,0 до 7,0) выход экстрагируемых белков остается низким, что в основном обусловлено растворением альбуминов. Интенсивное извлечение глобулинов начинается при pH 8,0 и возрастает с повышением щелочности среды. Максимальный выход белка достигается при сильнощелочных условиях (pH > 9,0) при отсутствии добавления солей, что обосновывает выбор данного

диапазона pH для дальнейшей оптимизации щелочной экстракции [13, 14]. Среди недостатков щелочной экстракции выделяют образование D-форм аминокислот и реакцию Майяра, приводящую к потемнению продукта. В то же время кислотная экстракция обеспечивает щадящее воздействие на аминокислотный состав и формирование белкового изолята с более светлой окраской [15]. Следующий этап в технологии получения изолята растительного белка – изоэлектрическое осаждение. В ходе этого процесса белок теряет свой заряд и выпадает в осадок [16].

Значение изоэлектрической точки (ИЭТ) растительных белков варьируется в диапазоне от 1,99 до 13,96, что охватывает почти весь спектр pH. Преобладают белки с низкой (смещенной в кислую область) ИЭТ, тогда как белки с высокой (смещенной в щелочную область) ИЭТ встречаются реже, а количество белков с ИЭТ, близкой к нейтральной, крайне мало [17]. Белок конопли 11S (гомологичен белкам бобовых) имеет ИЭТ при pH 6,4, в то время как 7S-вицилиноподобный белок характеризуется наименьшей растворимостью при pH 4,6 [18].

Эдестин и альбумин составляют 60–80 % и 20–30 % конопляного белка соответственно [19]. Конопляный глобулин состоит из 11S-эдестина и 7S-глобулина, при этом 11S-эдестин составляет 80 %, 7S-глобулин – 5 % белка конопли [20]. Эдестин – сложный белковый комплекс, представляющий собой гомогексамер с общей молекулярной массой около 300 кДа, аналогичный по структуре 11S-глобулину, характерному для бобовых культур. Он состоит из двух типов субъединиц, соединенных дисульфидными связями: кислой

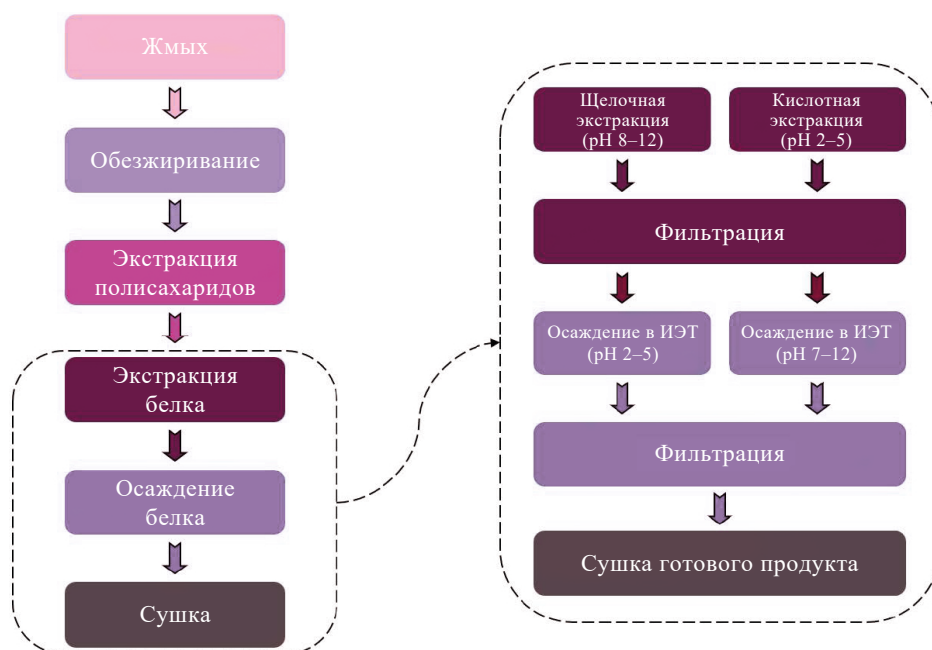


Рисунок 1. Получение изолята растительного белка (ИЭТ – изоэлектрическая точка)

Figure 1. Plant protein isolate: production protocol (ИЭТ – isoelectric point)

(~ 34 кДа) и щелочной, представленной фракциями с массой приблизительно 18 и 20 кДа. В составе других белковых компонентов выделяется 7S-глобулин, который представлен полипептидом массой 48 кДа. Третья фракция глобулинов включает вицилиноподобный протеин – бета-конглицинин, доля которого составляет около 5 % от общего белкового состава. Водорастворимая фракция альбуминов в основном представлена 2S-альбумином с молекулярной массой около 10 кДа, а также низкомолекулярными белками, масса которых не превышает 35 кДа [21, 22].

Цель исследования – изучить влияние параметров экстракции и изoeлектрического осаждения белка конопля (с расчетом теоретической и экспериментальной ИЭТ) на выход белковой фракции из обезжиренного гидролизованного жмыха и определить условия для его максимизации.

Объекты и методы исследования

Жмых конопля сорта Вера, выращенной в Пензенской области (Россия), был получен шнековым пресованием на малом предприятии по производству масла «ДобрыйЗнак.РФ» (Одинцово, Россия). Содержание сырого протеина в конопляном жмыхе составило $34,32 \pm 3,43$ %, сырого жира – $10,90 \pm 1,10$ %, сырой клетчатки – $31,85 \pm 3,19$ %. Измельчение жмыха конопля осуществляли до размера частиц не более 100 мкм, после чего проводили его обезжиривание с использованием органического растворителя н-гексана при соотношении сырья к растворителю 1:6, температуре 40 °С, в течение 2 ч при перемешивании 200 мин⁻¹. Затем смесь центрифугировали 15 мин при 4000 мин⁻¹. Обезжиренный осадок сушили при температуре 50 °С в течение 1,5 ч. Содержание сырого протеина в обезжиренном жмыхе составляло – $37,58 \pm 3,76$ %, сырого жира – $1,42 \pm 0,15$ %, сырой клетчатки – $38,55 \pm 3,86$ %. Далее жмых обрабатывали ферментным препаратом ЦеллоЛюкс А (Сиббиофарм, Россия) с дозировкой 2 % (2000 ед. ЦЛС/г) и временем гидролиза 4 ч. Ферментативная обработка обеспечила степень гидролиза некрахмальных полисахаридов до 35 % и способствовала увеличению содержания белка на 25 %. Полученную суспензию использовали далее.

Таблица 1. Интервалы варьирования независимых факторов

Table 1. Variability intervals of independent factors

Независимые переменные	Обозначение	Закодированное значение		
		–1	0	1
		Натуральное значение		
рН	x_1	10	11	12
Температура, °С	x_2	40	50	60
Время экстракции, ч	x_3	1	2	3

Для определения оптимальных параметров процесса экстракции был применен трехфакторный план Бокса-Бенкена, включающий 15 экспериментальных точек, в сочетании с методологией поверхности отклика (RSM). В качестве независимых переменных выбраны рН (x_1), температура (x_2) и время экстракции (x_3) (табл. 1).

Полученные коэффициенты регрессии считались значимыми при $p < 0,05$. Для анализа экспериментальных данных использовали дисперсионный анализ ANOVA программного обеспечения Statistica 10 (StatSoft Inc., США).

Степень экстракции белка конопля (DE), %, рассчитывали по формуле (1):

$$DE = \frac{C \times V}{PC} \times 100 \times m \quad (1)$$

где C – концентрация белка в экстракте, мг/мл; V – объем суспензии, мл; PC – содержание сырого протеина в исследуемом образце, %; m – масса АСВ навески обезжиренного и гидролизованного жмыха конопля, мг.

Определение концентрации белка в экстракте проводили с использованием метода Бредфорда согласно ОФС.1.2.3.0012.15 «Определение белка». Определение сырого протеина выполняли по ГОСТ 13496.4-2019. Оценка эффективности экстракции по соотношению растворимого белка к сырому протеину может иметь погрешность: метод Кьельдаля определяет общий азот (включая не только белки), тогда как метод Бредфорда чувствителен к рН, типу белка и калибровочному стандарту.

В качестве экстракции с NaCl использовали концентрации от 0 до 1 моль/л с шагом в 0,2 при оптимальных параметрах экстракции, которые были получены с использованием математической модели.

Вычисление теоретической изoeлектрической точки осуществляли с использованием биоинформатических баз данных UniProt, PepDraw и протеинового калькулятора Isoelectric Point Calculator 2.0 путем анализа суммарного заряда белка.

Экспериментальное осаждение белка в фугате выполняли после экстракции и центрифугирования образца при 4000 мин⁻¹ в течение 15 мин. Осаждение проводили при рН от 2,0 до 6,0 с выдержкой 10 мин при температуре 5 °С с использованием 10 % раствора HCl. Выход белка рассчитывали как отношение разницы между содержанием растворимого белка до и после осаждения к его количеству до осаждения с использованием метода Бредфорда.

Белковый электрофорез в полиакриламидном геле проводили в камере для вертикального электрофореза Mini-PROTEAN Tetra Cell (Bio-Rad, США). При приготовлении гелей использовали реактивы и наборы G2003-50T (Servicebio, Китай). Окраску белка в гелях производили красителем Кумасси R-250. Для опреде-

ления молекулярной массы использовали стандарт смеси белков-маркеров 10–200 кДа – набор G2058-250UL (Servicebio, Китай). Электрофорез проводили по методу Леммли, основанному на разделении белков по их молекулярной массе.

Определение абсолютно сухого вещества осуществляли путем высушивания до постоянной массы по ГОСТ 31640-2012, сырой золы – по ГОСТ 32933-2014, «истинного» белка – по ГОСТ Р 57221-2016 (метод Барнштейна).

Результаты и их обсуждение

На функциональные свойства белка влияют методы и условия экстракции (значение pH, наличие или отсутствие моно- и поливалентных солей, ионная сила среды, используемой для экстракции белка, время и температура). Как правило, методы экстракции, включающие длительные и высокие температурные условия, приводят к образованию белковых изолятов с пониженными питательными свойствами. В щелочной экстракционной среде может произойти ряд нежелательных реакций, таких как рацемизация аминокислот, образование лизиноаланина, снижение усвояемости и потеря незаменимых аминокислот [2, 23]. Таким образом, оптимизация физических параметров экстракции является критически важным этапом для получения высококачественного изолята белка из конопли.

Для определения оптимальных параметров щелочной экстракции белка с учетом температурных условий, значений pH и времени экстракции был построен трехфакторный план Бокса-Бенкина и применена методология поверхности отклика. Результаты 15 экспериментов по экстракции представлены в таблице 2.

Полученная регрессионная модель характеризуется коэффициентом детерминации $R^2 = 0,983$, что

указывает на высокую степень корреляции между факторами и описывается следующим уравнением в кодированной форме (2):

$$DE = -1084,23 + 174,95x_1 + 6,26x_2 - 2,64x_3 - 0,21x_1x_2 + 0,34x_1x_3 + 0,05x_2x_3 - 7,36x_1^2 - 0,04x_2^2 - 0,46x_3^2 \quad (2)$$

где DE – степень экстракции белка, %; x_1 – pH; x_2 – температура, °C; x_3 – время экстракции, ч.

Для определения значимости построенной модели провели анализ ANOVA (табл. 3).

Статистически значимое влияние на степень экстракции белка ($p < 0,05$) оказывали линейные эффекты всех трех факторов (pH, температура, время), квадратичные эффекты pH и температуры, а также их парное взаимодействие. Взаимодействие pH и температуры указывает на то, что их совместное изменение оказывает более выраженное влияние, чем сумма индивидуальных эффектов. Полученные данные позволяют построить математическую модель процесса экстракции, которая может быть использована для прогнозирования выхода белка и выбора оптимальных условий проведения процесса в лабораторных и промышленных масштабах.

На рисунке 2 представлены графики поверхности отклика, отражающие влияние двух независимых факторов на степень экстракции белка.

Поверхности отклика демонстрируют выраженный характер зависимости выхода белка от факторов процесса. Наибольшее влияние оказывает взаимодействие pH и температуры с четким максимумом в области 11,0–11,5 и 50–55 °C, что соответствует форме графика. Влияние времени проявляется слабее с умеренным ростом экстракции до 2,5–3,0 ч. Выход за пределы указанного диапазона pH (выше 11,5) сопро-

Таблица 2. Результаты экспериментов по экстракции белка

Table 2. Protein extraction results

Эксперимент	pH	Температура, °C	Время, ч	Экспериментально полученное значение степени экстракции, %	Предсказанное моделью значение степени экстракции, %
1	10	40	2	36,64	39,34
2	10	50	1	42,73	42,82
3	10	50	3	45,75	44,83
4	10	60	2	45,52	42,55
5	11	60	3	53,71	54,27
6	11	50	2	55,45	55,45
7	11	50	2	55,78	55,45
8	11	50	2	55,11	55,45
9	11	40	1	49,43	47,95
10	11	40	3	51,27	51,06
11	11	60	1	50,02	51,16
12	12	60	2	47,57	49,07
13	12	50	1	49,07	49,33
14	12	50	3	53,21	52,45
15	12	40	2	46,87	45,86

Таблица 3. Анализ ANOVA для квадратичной модели экстракции белка из жмыха конопли

Table 3. Quadratic model of protein extraction from hemp cake (ANOVA)

Параметры	Сумма квадратов	Степень свободы	Среднеквадратичная ошибка	F-значение	p-значение
x_1	85,02	1	85,02	63,40	< 0,05
x_1^2	199,85	1	199,85	149,02	< 0,05
x_2	20,61	1	20,61	15,37	< 0,05
x_2^2	55,65	1	55,65	41,49	< 0,05
x_3	19,41	1	19,41	14,47	< 0,05
x_3^2	0,77	1	0,77	0,58	0,48
x_1x_2	17,68	1	17,68	13,19	< 0,05
x_1x_3	0,46	1	0,46	0,34	0,59
x_2x_3	0,86	1	0,86	0,64	0,46
Ошибка	177,79	5	35,56	—	—
Общая SS	860,23	14	—	—	—

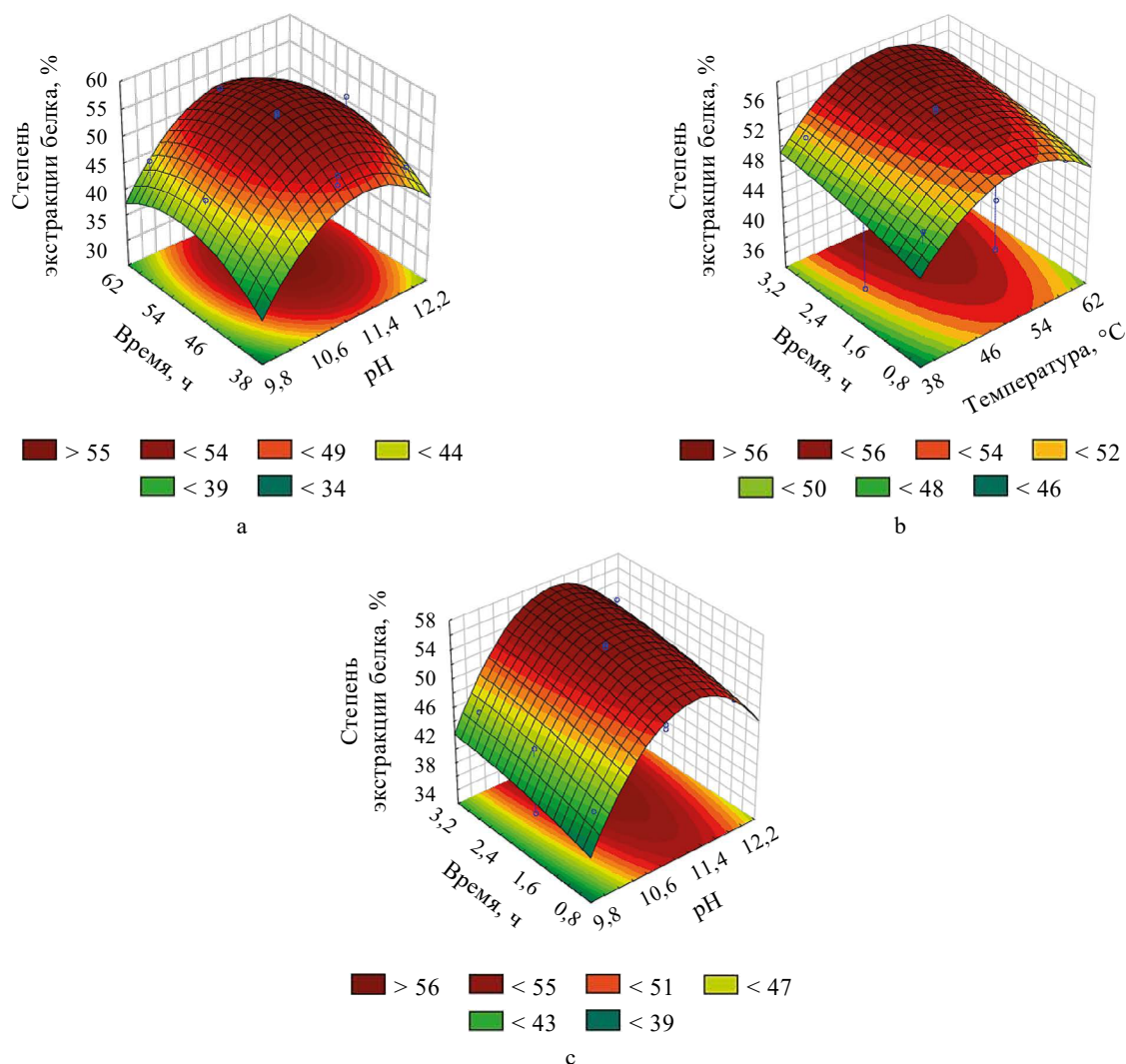


Рисунок 2. Влияние независимых переменных на степень экстракции белка из конопляного жмыха:

a – pH и температура; b – температура и время

Figure 2. Effect of independent variables on protein extraction from hemp cake: a – pH and temperature; b – temperature and time; and c – pH and time

вождается снижением степени экстракции, что может быть связано с денатурацией белков или образованием нерастворимых комплексов. Для температуры также установлен порог выше 55 °С, превышение которого ведет к ухудшению экстракции вследствие термической денатурации белка.

Для рационализации параметров экстракции использовали функцию желательности. За полностью желательный отклик (значение функции 1) была принята степень экстракции 100 %, за полностью неприемлемое значение отклика (значение функции 0) – 0 % (рис. 3).

Результаты моделирования показали, что оптимальные условия экстракции для достижения максимального выхода белка соответствуют pH 11,2, температуре 52 °С и времени экстракции 3 ч. Использование функции желательности позволило определить точку, в которой достигается оптимальный баланс между всеми факторами. При данных параметрах предсказанная степень экстракции белка составила 57,1 %, что было подтверждено экспериментально: в оптимальных условиях достигнута степень экстракции 61,4 %. Таким образом, полученное значение (61,4 %) превышает пороговый уровень 55 %.

Для повышения выхода белка использовали экстракцию с хлоридом натрия (NaCl). Этот подход основан на способности солей изменять ионную силу среды, что способствует дезагрегации белковых струк-

тур и их последующему растворению за счет ослабления гидрофобных взаимодействий и электростатических связей между белками и матрицей субстрата (жмыха конопли) [24]. Комбинация различных концентраций соли и pH используется для селективного растворения или осаждения фракций глобулинов и вицилина при фракционировании белка [1, 25]. На рисунке 4 представлен график влияния концентрации хлорида натрия (0,2–1,0 моль/л) на степень экстракции белка в оптимальных условиях, рассчитанных с использованием математической модели.

По результатам экстракции с применением хлорида натрия установлено, что добавление соли не способствует высокой эффективности извлечения белка по сравнению с контрольным образцом (61,4 %), где использовалась стандартная щелочная экстракция (pH 11,2, время 3 ч, температура 52 °С). При использовании 0,2 моль/л раствора хлорида натрия степень экстракции снижается на 13,5 %. Однако с повышением концентрации соли наблюдается рост степени экстракции. Это можно объяснить эффектом засоления: ионные соединения в определенном диапазоне ионной силы ослабляют электростатические взаимодействия между молекулами белка и способствуют его лучшей гидратации, что в итоге приводит к увеличению растворимости белка [13]. Полученные данные согласуются с результатами работы E. Cabral *et al.*, в которой степень

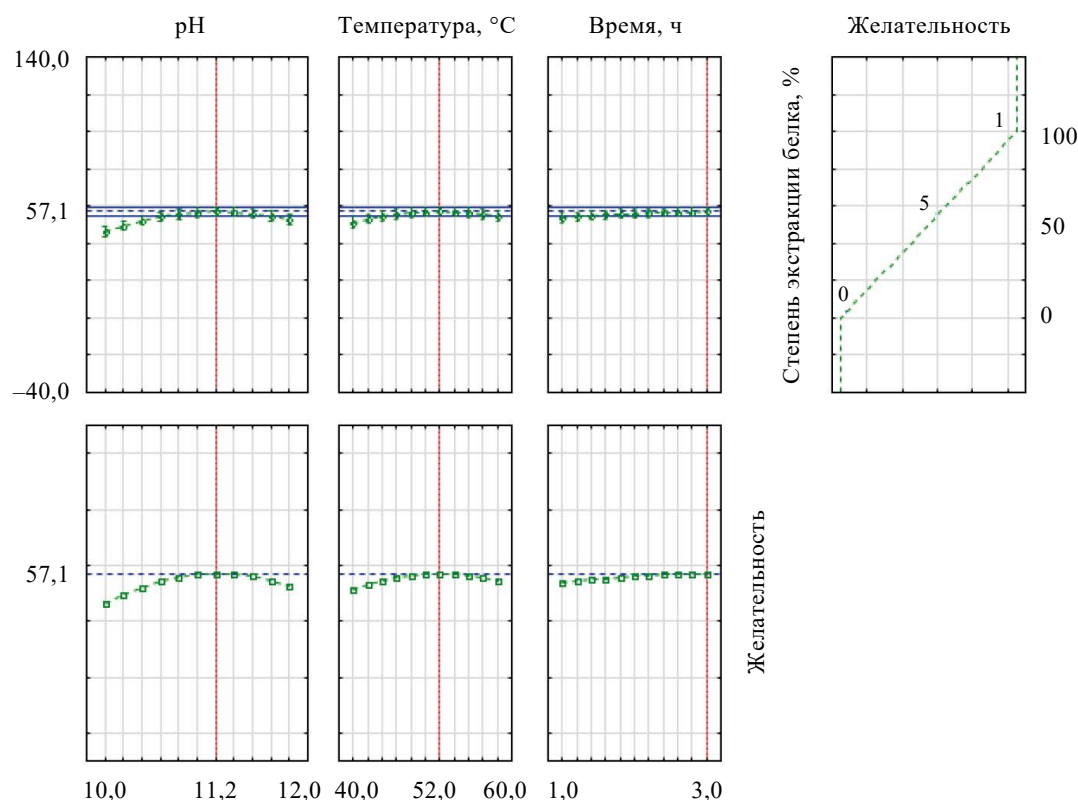


Рисунок 3. Профили предсказанных значений и функции желательности

Figure 3. Modeled values and desirability functions

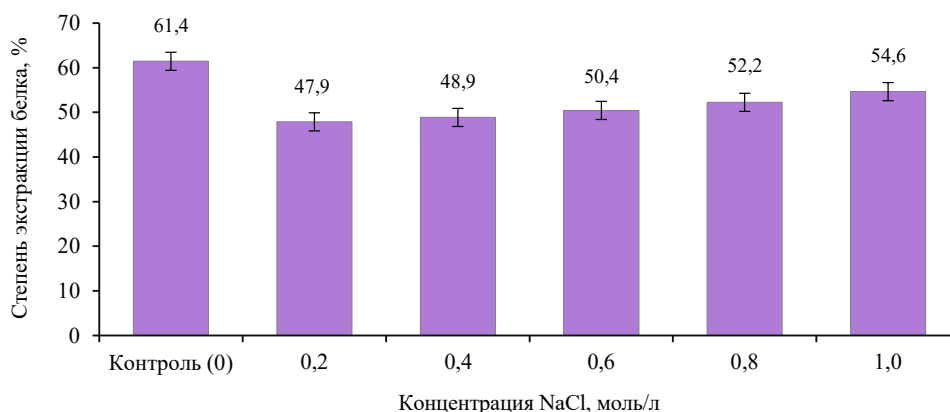


Рисунок 4. Степень экстракции белка с использованием NaCl

Figure 4. Protein extraction with NaCl

Таблица 4. Теоретическая изоэлектрическая точка белка конопли

Table 4. Modeled isoelectric point of hemp protein

Белок	Ген	Номер белка в UniProt	ИЭТ белка в PepDraw	Среднее значение ИЭТ PepDraw
Эдестин	CsEde1D	A0A090CXP5	7,19	7,44
	CsEde2A	A0A090CXP9	7,68	
	CsEde1B	A0A090CXP7	7,17	
	CsEde2B	A0A090DLI7	7,71	
	CsEde2C	A0A090CXP8	7,68	
	CsEde1A	A0A090DLH8	7,19	
2S-альбумин	Cs2S1	A0A219D1L6	5,11	5,11
7S-вицилиноподобный белок	Cs7S	A0A219D1T7	6,97	6,97
Среднее значение ИЭТ для белка конопли			7,09	
Теоретическая ИЭТ PepDraw = $(7,44 \times 75 \% + 5,11 \times 20 \% + 6,97 \times 5 \%) = 6,95$				

Примечание: ИЭТ – изоэлектрическая точка.

Note: ИЭТ – isoelectric point.

экстракции после обработки щелочью без внесения хлорида натрия составляла 60–78 %, при внесении соли 20–48 % [25].

Далее определяли теоретическую изоэлектрическую точку (ИЭТ) растительного белка конопли с использованием биоинформационных баз данных UniProt и PepDraw. Результаты по теоретическому изоэлектрическому осаждению белка представлены в таблице 4.

Теоретическая ИЭТ белка эдестина составляет от 7,19 до 7,68. В базе данных UniProt для 2S-альбумина и 7S-вицилиноподобного белка было идентифицировано только по одному гену, что позволило определить их ИЭТ как 5,11 и 6,97 соответственно. Суммарная ИЭТ белкового комплекса конопли, рассчитанная с учетом относительного содержания его компонентов (по данным научной литературы: эдестин – 75 %; альбумин – 20 %; 7S-вицилиноподобный белок – 5 %), составила 6,95. Также выполнен расчет теоретической ИЭТ с использованием биоинформационного калькулятора Isoelectric Point Calculator 2.0 (рис. 5) [27]. В качестве объекта использовали аминокислотные

последовательности в формате FASTA для 100 белков конопли (отсортированных по номерам в базе данных UniProt).

Предсказание ИЭТ осуществляли на основе уравнения Гендерсона-Хассельбаха для оценки суммарного заряда белка при различных значениях pH с дополнительным применением алгоритмов машинного обучения для повышения точности прогноза [28]. Рисунок 5 визуализирует расположение белков конопли в их ИЭТ (в основном от 4,20 до 10,54). На основе анализа предсказанных значений изоэлектрического осаждения для белков конопли было рассчитано среднее арифметическое значение (исходя из всех значений ИЭТ в программе IPC 2.0), составившее pH 7,22. По данным литературы, теоретические ИЭТ белков конопли были в диапазоне от слабых значений 5,07 до умеренно основных 9,61. При этом более 78 % белков обладали щелочной природой, т. е. их ИЭТ превышала pH 7 [29].

Далее экспериментально определяли ИЭТ белка конопли после щелочной экстракции с оптимальными параметрами экстракции белка (рис. 6).



Рисунок 5. Теоретическая изоэлектрическая точка белка конопли

Figure 5. Modeled isoelectric point of hemp protein

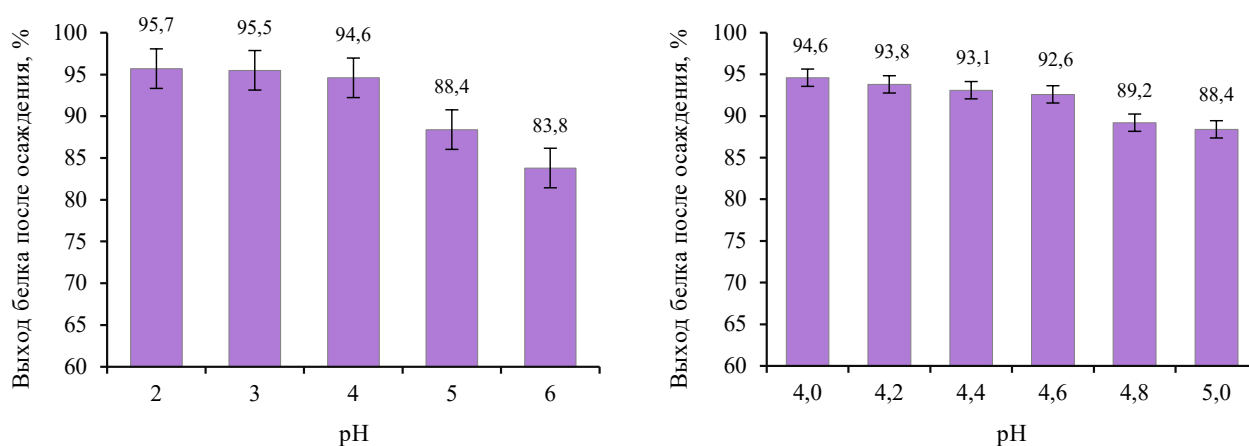


Рисунок 6. Определение изоэлектрической точки белка конопли

Figure 6. Isoelectric point of hemp protein

По результатам экспериментального изоэлектрического осаждения выявлено, что рациональные параметры лежат в диапазоне pH от 4,4 до 4,6, где чистота белка составляет 93,1–92,6 %. ИЭТ белка конопли совпадает с исследованиями зарубежных авторов А. Banskota *et al.* [8] и S. El-Sohaimy *et al.* [12], в которых pH составлял 4,5–4,6. Однако ИЭТ, определенная экспериментально, отличается от теоретической (pH 6,95–7,22), т. к. биоинформатические модели, основанные на аминокислотной последовательности, не учитывают влияние трехмерной структуры, посттрансляционных модификаций, локальных электростатических взаимодействий и склонности к агрегации – факторов, которые в реальных условиях существенно изменяют группы белков. Для эдестина расчетные значения ИЭТ значительно выше экспериментальных, что нельзя сказать об альбумине, где значения более приближены к экспериментальным. Таким образом, экспериментальная ИЭТ отражает истинное поведение

белка в среде, тогда как теоретическая величина представляет собой упрощенную модель [27, 30].

После определения оптимальных параметров экстракции был проведен электрофорез белковых экстрактов, полученных при обработке 0,4–1,0 М NaCl и при щелочной экстракции в диапазоне pH 9,0–12,0. Результаты электрофореза представлены на рисунке 7.

По данным электрофореза при использовании экстракции с хлоридом натрия обнаружены полосы (1) с молекулярной массой ~ 12 кДа, соответствующие 7 полипептидам в диапазоне 6–35 кДа [31]. Выявлена также полоса (2) с массой ~ 21 кДа, характерная для альбумина. Полоса (3) с молекулярной массой ~ 38 кДа соответствует мономеру эдестина [31, 32]. Кроме того, присутствуют полосы (4) в области 60–70 кДа, выявленные при солевой и щелочной экстракции.

Далее проводили сушку изолята белка при значениях pH экстракции 8–12 в лиофильной сушильной установке ВК-FD10S (Biobase, Китай). Визуализация

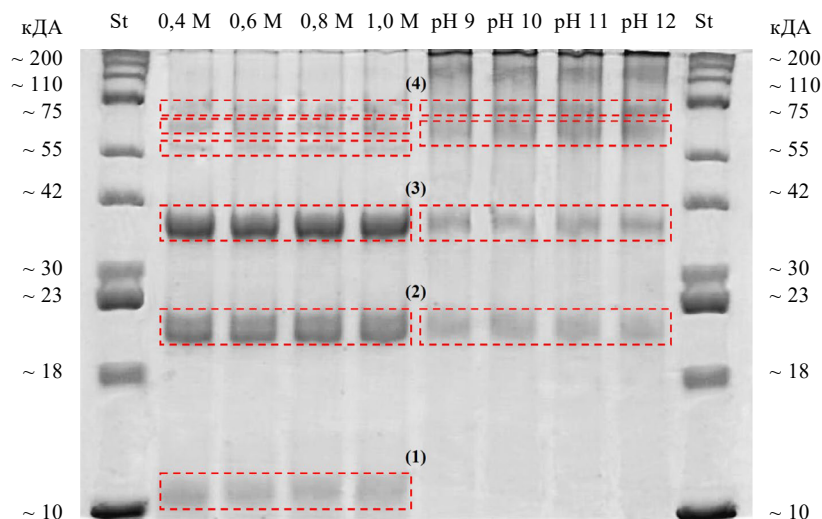


Рисунок 7. Электрофорез экстракта белка из жмыха конопли: St – стандартные маркеры G2058-250UL

Figure 7. Electrophoresis of protein extract from hemp cake: St – standard markers G2058-250UL

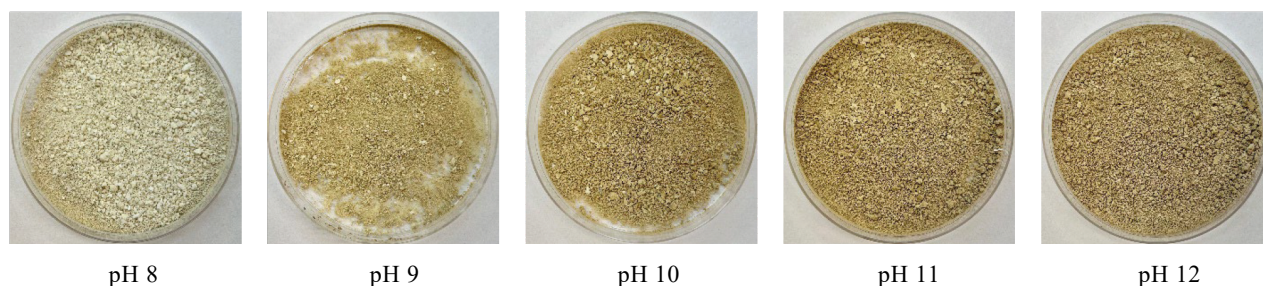


Рисунок 8. Изолят белка конопли после экстракции в диапазоне pH 8–12

Figure 8. Hemp protein isolate after extraction at pH 8–12

Таблица 5. Биохимический состав готового продукта

Table 5. Biochemical composition of the finished product

Абсолютно сухое вещество, %	Содержание сырого протеина, %	Содержание «истинного» белка, %	Содержание сырой золы, %
96,68 ± 4,83	92,28 ± 4,67	89,53 ± 4,48	4,27 ± 0,21

белковых изолятов, полученных при экстракции с различными значениями pH, представлена на рисунке 8.

При высоких значениях pH наблюдается повышенная растворимость и стабильность белковых фракций, что облегчает экстракцию. Цвет изолята при экстракции становится темнее (с белого до коричневого), однако при pH выше 10 эти изменения визуально незначительны. Сочетание щелочного экстрагирования и последующего осаждения в области ИЭТ позволяет оптимизировать процесс выделения белка конопли с высоким выходом. В таблице 5 представлен биохимический состав изолята белка конопли, полученный при оптимальных условиях процесса экстракции и осаждения.

По результатам оптимальной экстракции и изоэлектрического осаждения был получен продукт с содержанием сырого протеина на уровне 92,3 % и «истинного» белка 89,5 %. Данные указывают на высокую эффективность процессов высвобождения белка из жмыха конопли и их соответствие ГОСТ Р 72353-2025. Предложенный способ позволяет получить изолят белка конопли с выходом до 80 % относительно содержания белка в исходном сырье.

В дальнейших экспериментах будут определены аминокислотный состав и антиоксидантный потенциал изолята белка, а также выявлены функционально-технологические свойства продукта.

Выводы

В результате проведенного исследования с использованием математического моделирования на основе плана Бокса-Бенкена и методологии поверхности отклика были определены оптимальные параметры щелочной экстракции белка, обеспечивающие максимальную степень извлечения (57,1 % – предсказанные моделью и 61,4 % – полученные экспериментально). Оптимальными условиями являются pH 11,2, температура 52 °C и продолжительность экстракции 3 ч. Высокий коэффициент детерминации ($R^2 = 0,983$) свидетельствует об адекватности регрессионной модели и указывает на ее высокую точность и надежность. Дисперсионный анализ ANOVA подтверждает, что использование хлорида натрия в качестве экстрагента является менее эффективным и приводит к снижению степени экстракции белка на 6,8–13,5 % по сравнению со щелочной экстракцией.

Экспериментально оптимальные условия изоэлектрического осаждения белка конопли находятся в диапазоне pH 4,4–4,6, где достигается чистота белка 92,6–93,1 %. Суммарная теоретическая изоэлектрическая точка (ИЭТ) белка конопли составила 6,95–7,22, однако она не совпадает с экспериментальными данными, что может быть обусловлено влиянием посттрансляционных модификаций белков и электростатических взаимодействий. Для эдестина расчетные значения ИЭТ существенно превышают экспериментально полученные, в то время как у альбумина теоретические и экспериментальные ИЭТ частично согласуются. Это свидетельствует о том, что экспериментальная ИЭТ более точно отражает реальное поведение белка в среде, тогда как теоретическое значение представляет собой упрощенную модель, не учитывающую все физико-химические процессы.

Таким образом, установленные оптимальные параметры экстракции и изоэлектрического осаждения позволяют эффективно извлекать белок из жмыха конопли с высоким выходом, что делает их перспективными для разработки технологий получения белкового изолята. Содержание сырого протеина в конечном продукте составило 92,3 %, «истинного» белка – 89,5 %.

Критерии авторства

Д. И. Алексаночкин – проведение исследования, написание и редактирование рукописи, оформление под требования журнала. И. А. Фоменко – научное консультирование, обсуждение результатов, формулировка выводов. И. А. Детинкин – планирование эксперимента, написание рукописи. И. М. Чернуха – руководство исследованием и его концептуализация. Н. Г. Машенцева – руководство исследованием, написание рукописи, верификация данных.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution

D.I. Aleksanochkin conducted the research, wrote, and proofread the manuscript. I.A. Fomenko provided scientific counselling, discussed the results, and formulated the conclusions. I.A. Detinkin designed the experiment and wrote the manuscript. I.M. Chernukha supervised the research and developed the concept. N.G. Mashentseva supervised the research, wrote the manuscript, and verified the data.

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Список литературы / References

1. Fang B, Peng Z, Chen B, Rao J. Unconventional sources of vegetable proteins: Technological properties. *Current Opinion in Food Science*. 2024;57:101150. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2024.101150>
2. Hadnađev MS, Hadnađev TRD, Pojić MM, Šarić BM, Mišan AČ, *et al.* Progress in vegetable proteins isolation techniques: A review. *Food and Feed Research*. 2017;44(1):11–22. <http://dx.doi.org/10.5937/FFR1701011H>
3. Fang B, Chang L, Ohm J-B, Chen B, Rao J. Structural, functional properties, and volatile profile of hemp protein isolate as affected by extraction method: Alkaline extraction – isoelectric precipitation vs salt extraction. *Food Chemistry*. 2023;405:135001. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.135001>
4. Серков В. А., Кабунина И. В. Конопля посевная – перспективный сырьевой ресурс для масложировой промышленности России. *Международный сельскохозяйственный журнал*. 2023. № 2. С. 188–191. [Serkov VA, Kabunina IV. Prospects of seed hemp for the Russian fat and oil industry. *International Agricultural Journal*. 2023;(2):188–191. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/RJMTYI>
5. Rizzo G, Storz MA, Calapai G. The role of hemp (*Cannabis sativa* L.) as a functional food in vegetarian nutrition. *Foods*. 2023;12(18):3505. <https://doi.org/10.3390/foods12183505>
6. Burton RA, Andres M, Cole M, Cowley JM, Augustin MA. Industrial hemp seed: From the field to value-added food ingredients. *Journal of Cannabis Research*. 2022;4(1):45. <https://doi.org/10.1186/s42238-022-00156-7>
7. Leonard W, Zhang P, Ying D, Fang Z. Hempseed in food industry: Nutritional value, health benefits, and industrial applications. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 2020;19(1):282–308. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12517>

8. Banskota AH, Tibbetts SM, Jones A, Stefanova R, Behnke J. Biochemical characterization and *in vitro* digestibility of protein isolates from hemp (*Cannabis sativa* L.) by-products for salmonid feed applications. *Molecules*. 2022;27(15):4794. <https://doi.org/10.3390/molecules27154794>
9. Tang C-H, Ten Z, Wang X-S, Yang X-Q. Physicochemical and functional properties of hemp (*Cannabis sativa* L.) protein isolate. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2006;54(23):8945–8950. <https://doi.org/10.1021/jf0619176>
10. Liu M, Toth JA, Childs M, Smart LB, Abbaspourrad A. Composition and functional properties of hemp seed protein isolates from various hemp cultivars. *Journal of Food Science*. 2023;88(3):942–951. <https://doi.org/10.1101/2022.06.01.494437>
11. Karabulut G, Feng H, Yemiş O. Physicochemical and antioxidant properties of industrial hemp seed protein isolate treated by high-intensity ultrasound. *Plant Foods for Human Nutrition*. 2022;77(4):577–583. <https://doi.org/10.1007/s11130-022-01017-7>
12. El-Sohaimy SA, Androsova NV, Toshev AD, El Enshasy HA. Nutritional quality, chemical, and functional characteristics of hemp (*Cannabis sativa* ssp. *sativa*) protein isolate. *Plants*. 2022;11(21):2825. <https://doi.org/10.3390/plants11212825>
13. Potin F, Lubbers S, Husson F, Saurel R. Hemp (*Cannabis sativa* L.) protein extraction conditions affect extraction yield and protein quality. *Journal of Food Science*. 2019;84(12):3682–3690. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.14850>
14. Алексаночкин Д. И., Фоменко И. А., Алексеева Е. А., Чернуха И. М., Машенцева Н. Г. Получение растительного белка из семян и жмыха промышленной конопли: обзор способов переработки для использования в пищевой промышленности. *Пищевые системы*. 2024. Т. 7. № 2. С. 179–188. [Aleksanochkin DI, Fomenko IA, Alekseeva EA, Chernukha IM, Mashentseva NG. Production of plant protein from seeds and cake of industrial hemp: Overview of processing methods for food industry. *Food System*. 2024;7(2):179–188. (In Russ.)] <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2024-7-2-188-197>
15. Нгуэт Х. Т. М. Исследование процесса экстракции белковых веществ из белого лепестка сои водными растворами минеральных кислот и щелочей. *Успехи в химии и химической технологии*. 2007. Т. 21. № 12. С. 33–35. [Nguet HTM. Extracting protein substances from soya white petals with aqueous solutions of mineral acids and alkalis. *Advances in Chemistry and Chemical Technology*. 2007;21(12):33–35. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/QZMGNH>
16. Mondor M, Hernández-Álvarez AJ. Processing technologies to produce plant protein concentrates and isolates. In: Manickavasagan A, Lim L-T, Ali A, editors. *Plant protein foods*. Cham: Springer International Publishing; 2022. pp. 61–108. https://doi.org/10.1007/978-3-030-91206-2_3
17. Mohanta TK, Khan A, Hashem A, Abd_Allah EF, Al-Harrasi A. The molecular mass and isoelectric point of plant proteomes. *BMC Genomics*. 2019;20(1):631. <https://doi.org/10.1186/s12864-019-5983-8>
18. Ajibola CF, Aluko RE. Physicochemical and functional properties of 2S, 7S, and 11S enriched hemp seed protein fractions. *Molecules*. 2022;27(3):1059. <https://doi.org/10.3390/molecules27031059>
19. Dapčević-Hadnadev T, Dizdar M, Pojić M, Krstonošić V, Zychowski LM, et al. Emulsifying properties of hemp proteins: Effect of isolation technique. *Food Hydrocolloids*. 2019;89:912–920. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2018.12.002>
20. Ma S, Ye A, Singh H, Acevedo-Fani A. Heat-induced interactions between microfluidized hemp protein particles and caseins or whey proteins. *Food Chemistry*. 2025;463:141290. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.141290>
21. Rehman M, Fahad S, Du G, Cheng X, Yang Y, et al. Evaluation of hemp (*Cannabis sativa* L.) as an industrial crop: A review. *Environmental Science and Pollution Research*. 2021;28(38):52832–52843. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-16264-5>
22. Li A, Zheng J, Han X, Jiang Z, Yang B, et al. Health implication of lactose intolerance and updates on its dietary management. *International Dairy Journal*. 2023;140:105608. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2023.105608>
23. Isnaini L, Estiasih T, Suseno SH, Lestari LA. The role vegetable proteins to stabilize emulsion: A mini review. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021;924(1):012036. <http://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/924/1/012036>
24. Zhang J. Protein-protein interactions in salt solutions. *Protein-protein Interactions-computational and Experimental Tools*. 2012;6:359–376. <https://doi.org/10.5772/38056>
25. Zhang Y, Roman L, Kirkensgaard JJK, Corredig M. Effect of salt extraction on composition, structure, and thermal properties of pea protein. *Food Chemistry*. 2025;144650. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2025.144650>
26. Cabral EM, Poojary MM, Lund MN, Curtin J, Fenelon M, et al. Effect of solvent composition on the extraction of proteins from hemp oil processing stream. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2022;102(14):6293–6298. <https://doi.org/10.1002/jsfa.11979>
27. Kozłowski LP. IPC–isoelectric point calculator. *Biology Direct*. 2016;11(1):55. <https://doi.org/10.1186/s13062-016-0159-9>
28. Kozłowski LP. IPC 2.0: Prediction of isoelectric point and pKa dissociation constants. *Nucleic Acids Research*. 2021;49(W1):W285–W292. <https://doi.org/10.1093/nar/gkab295>
29. Kaur N, Verma A, Girdhar M, Kumar A, Siddiqui MA, et al. Genome-wide analysis of the *Cannabis sativa* cytochrome P450 monooxygenase superfamily and uncovering candidate genes for improved herbicide tolerance. *Frontiers in Plant Science*. 2024;15:1490036. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1490036>

30. Kruchinin AG, Bolshakova EI. Hybrid strategy of bioinformatics modeling (*in silico*): Biologically active peptides of milk protein. Food Processing: Techniques and Technology. 2022;52(1):46–57. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2022-1-46-57>
31. Potin F, Saurel R. Hemp seed as a source of food proteins. In: Crini G, Lichtfouse E, editors. Sustainable agriculture reviews 42: Hemp production and applications. Cham: Springer International Publishing; 2020. pp. 265–294. https://doi.org/10.1007/978-3-030-41384-2_9
32. Yano H, Fu W. Hemp: A sustainable plant with high industrial value in food processing. Foods. 2023;12(3):651. <https://doi.org/10.3390/foods12030651>

Дополнительная информация об авторах / Additional information about the authors

Алексаночкин Денис Игоревич / Denis I. Aleksanochkin ORCID 0009-0000-7677-6583; eLIBRARY SPIN 1732-9580
Фоменко Иван Адреевич / Ivan A. Fomenko ORCID 0000-0003-2478-1705; eLIBRARY SPIN 5861-2838
Детинкин Илья Александрович / Ilya A. Detinkin ORCID 0009-0004-0985-9505; eLIBRARY SPIN 4596-4802
Чернуха Ирина Михайловна / Irina M. Chernukha ORCID 0000-0003-4298-0927; eLIBRARY SPIN 3423-3754
Машенцева Наталья Геннадьевна / Natalia G. Mashentseva ORCID 0000-0002-9287-0585; eLIBRARY SPIN 9791-5806

<https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-2-2634>
<https://elibrary.ru/YXUXCJ>

Review article
Available online at <https://fptt.ru/en>

Targeted and Untargeted Methods for Fish Quality Assessment (*Oncorhynchus mykiss*)



Mikhail N. Kutuzov¹, Maria A. Belova^{1,2},
Olga V. Novichenko^{1,3}, Igor A. Nikitin^{1,2}, Hicham Zaroual^{1,4},
Vladislav S. Vishnyakov¹, Daria D. Vilko^{1,*}

¹ Cherepovets State University^{ROR}, Cherepovets, Russia

² Plekhanov Russian University of Economics^{ROR}, Moscow, Russia

³ Astrakhan Tatishchev State University^{ROR}, Astrakhan, Russia

⁴ Abdelmalek Essaadi University^{ROR}, Tetouan, Morocco

Received: 28.01.2026

Revised: 12.03.2026

Accepted: 07.04.2026

*e-mail: dariavilkova333@gmail.com

© M.N. Kutuzov, M.A. Belova, O.V. Novichenko, I.A. Nikitin, H. Zaroual,
V.S. Vishnyakov, D.D. Vilko, 2026



Abstract.

Fish quality control demands efficient analytical solutions. While conventional (targeted) assessment methods are reliable, their labor-intensive and destructive nature drives the development of rapid, non-destructive (untargeted) technologies. This review features rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) as a key global aquaculture species.

It compares, systematizes, and summarizes data on the capabilities, limitations, and prospects of applying targeted and untargeted assessment methods to fish raw materials in general and rainbow trout in particular. The review spans a decade of publications, comparing conventional quality assessment approaches (sensory, physicochemical, and microbiological methods) with advanced instrumental techniques (infrared spectroscopies, Raman spectroscopy, hyperspectral imaging, nuclear magnetic resonance spectroscopy).

Untargeted methods, e.g., spectroscopy and imaging, enable rapid, non-invasive assessment of such key freshness parameters as chemical composition, lipid oxidation degree, spoilage, and storage time. In contrast, targeted methods remain crucial for validation and precise quantification of specific indicators, especially at later stages of spoilage. Untargeted methods show strong suitability for integration into real-time monitoring systems at fish processing facilities. However, their implementation requires robust calibration, specialized mathematical models, and representative reference databases.

Rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) demonstrates the effectiveness of spectroscopic fish quality control methods, combining speed, non-invasiveness and the potential for online monitoring.

Keywords. Fish freshness, rapid analysis, control methods, spectroscopy, chemometrics, *Oncorhynchus mykiss*

Funding. This research was supported by the Russian Science Foundation, Project no. 23-76-10038.

For citation: Kutuzov MN, Belova MA, Novichenko OV, Nikitin IA, Zaroual H, *et al.* Targeted and Untargeted Methods for Fish Quality Assessment (*Oncorhynchus mykiss*). Food Processing: Techniques and Technology. 2026;56(2):260–276. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-2-2634>

Целевые и нецелевые методы оценки качества рыбного сырья: обзор на примере радужной форели



М. Н. Кутузов¹, М. А. Белова^{1,2},
О. В. Новиченко^{1,3}, И. А. Никитин^{1,2}, Х. Заруал^{1,4},
В. С. Вишняков¹, Д. Д. Вилкова^{1,*}

¹ Череповецкий государственный университет^{ROR}, Череповец, Россия

² Российский экономический университет имени Г. В. Плеханова^{ROR}, Москва, Россия

³ Астраханский государственный университет имени В. Н. Татищева^{ROR}, Астрахань, Россия

⁴ Университет Абдула Малика Аль Саади^{ROR}, Тетуан, Марокко

Поступила в редакцию: 28.01.2026

*e-mail: dariavilkova333@gmail.com

Принята после рецензирования: 12.03.2026

© М. Н. Кутузов, М. А. Белова, О. В. Новиченко, И. А. Никитин,

Принята к публикации: 07.04.2026

Х. Заруал, В. С. Вишняков, Д. Д. Вилкова, 2026



Аннотация.

Контроль качества рыбного сырья требует эффективных аналитических решений. Несмотря на надежность традиционных (целевых) методов оценки, их трудоемкость и деструктивный характер стимулируют развитие быстрых неразрушающих (нецелевых) технологий. Цель исследования – провести сравнительный анализ, систематизировать и обобщить данные о возможностях, ограничениях и перспективах применения целевых и нецелевых методов для оценки рыбного сырья на примере радужной форели.

Объектом сравнительного анализа является радужная форель (*Oncorhynchus mykiss*), представляющая собой один из ключевых видов мировой аквакультуры. На основе систематического обзора научной литературы за 2014–2024 гг. проведен анализ традиционных методов (сенсорный, физико-химический, микробиологический) и современных инструментальных подходов (ИК- и рамановская спектроскопия, гиперспектральная визуализация, ЯМР-спектроскопия).

Установлено, что нецелевые методы (спектроскопический, методы визуализации) обеспечивают быструю неинвазивную оценку ключевых параметров свежести: химического состава, степени окисления липидов, уровня микробной обсемененности и срока хранения. В свою очередь, целевые методы сохраняют значение для валидации и точного количественного определения специфических показателей, особенно на поздних стадиях порчи. Нечелевые методы демонстрируют высокий потенциал для внедрения в системы оперативного контроля рыбоперерабатывающих предприятий. Ключевыми условиями их успешного применения являются корректная калибровка, построение математических моделей и формирование репрезентативных эталонных баз данных.

Радужная форель (*Oncorhynchus mykiss*) демонстрирует эффективность спектроскопических методов контроля качества рыбы, сочетая быстроту, неинвазивность и потенциал для онлайн-мониторинга.

Ключевые слова. Свежесть рыбы, экспресс-анализ, методы контроля, спектроскопия, хеометрия, *Oncorhynchus mykiss*

Финансирование. Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 23-76-10038.

Для цитирования: Кутузов М. Н., Белова М. А., Новиченко О. В., Никитин И. А., Заруал Х. и др. Целевые и нецелевые методы оценки качества рыбного сырья: обзор на примере радужной форели. Техника и технология пищевых производств. 2026. Т. 56. № 2. С. 260–276. (На англ.) <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-2-2634>

Introduction

The recognized nutritional value of fish fuels a steady increase in global fish consumption. Fish is a reliable source of vitamins, minerals, and high-quality protein. It also provides the human body with long-chain omega-3 polyunsaturated fatty acids, such as eicosapentaenoic acid and docosahexaenoic acid [1]. As the commercial fishery resources keep shrinking, the global food industry turns to aquaculture. According to the Food and Agri-

culture Organization of the United Nations (FAO), fish farms are responsible for 94.4 million tons, or 51% of the global fish production, which means that the share of aquaculture has surpassed that of industrial catch [2].

The salmonids (*Salmonidae*) are a valuable aquaculture family, with the rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) being its most important commercial species. *O. mykiss* is the second most popular farmed trout in the world due to its adaptability, rapid growth, and high

feed consumption, as well as the superior sensory profile of its meat [2]. As a result of the growing demand, rainbow trout is now farmed on five continents, from the Arctic Circle to the south of Argentina [3]. Its production has nearly doubled over the past 20 years, as reported by the FAO. The high demand can also be explained by its high nutritional qualities: *O. mykiss* has a valuable dietary and delicacy fillet that contains iron, potassium, calcium, copper, magnesium, sodium, zinc, and phosphorus [4].

Fish is usually consumed fresh: in 2022, fresh and chilled fish accounted for approximately 43% of total fish consumption [2]. Unfortunately, fish is a highly perishable product, which significantly complicates logistics and quality control procedures. Its rapid microbiological spoilage and oxidation remain a major challenge. The spoilage intensity directly depends on storage conditions. Therefore, the primary task of fish processing facilities is to ensure the quality and safety declared on the label. Compliance with this requirement is mandatory both for regulatory and oversight bodies, as well as for consumer transparency. This task is equally important for fish producers, seeking to maintain the brand reputation and consumer confidence.

Spoilage processes are complex and multi-stage as they involve physical, chemical, and microbiological changes that lead to the degradation of fats and proteins. Bacterial growth, enzymatic autolysis, and subsequent oxidation reduce the product quality. Robust fish quality control mitigates rapid spoilage, protects public health, reduces economic losses, and promotes sustainable use of natural resources.

Fish quality assessment methods are categorized into targeted and non-targeted. Targeted methods are also referred to as conventional, classical, or destructive. Non-targeted methods, on the contrary, are considered instru-

mental or non-destructive. Despite the differences in terminology, both approaches are analytical, and distinguishing between them is sometimes impossible.

Targeted methods measure a specific, predetermined parameter or property. For instance, physicochemical methods determine lipid oxidation, moisture, pH, and total volatile basic nitrogen. Sensory assessment evaluates such parameters as smell, color, taste, texture, etc. Microbiological methods reveal the total microbial count and the concentration of psychrophilic microorganisms. Although they are effective in assessing the quality of fish and fish products, most of these methods remain time-consuming and labor-intensive.

Non-invasive and non-destructive instrumental methods are attracting increasing attention from researchers. For example, infrared and Raman spectroscopy are fast, cheap, and operator-independent. Single spectral analysis provides a significant amount of information. Spectroscopic methods require minimal to no sample preparation. In addition to providing a comprehensive assessment of fish quality, these methods determine shelf life and identify the processing history, e.g., freezing or repeated freeze-thaw cycles.

This gap between the labor-intensive standard quality control and the industry's demand for rapid, real-time analysis needs a systematized comparative evaluation of analytical approaches to trout quality assessment. This review (Fig.) summarizes and compares data on targeted and non-targeted methods for rainbow trout quality assessment.

Study objects and methods

This systematic literature review followed the protocol developed by H. Snyder [5] and R. Torracco [6]. It covered articles published in 2015–2024 and registered in international (ScienceDirect, PubMed, Springer Link)

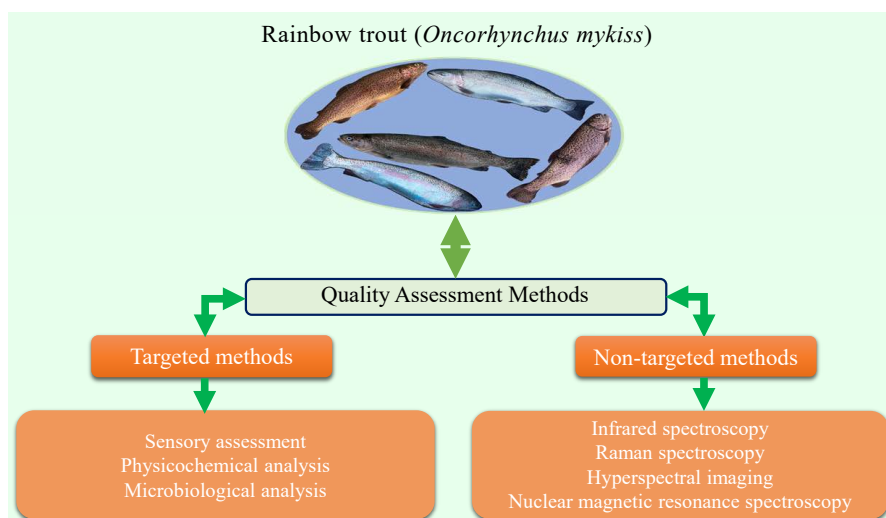


Figure. Methods for assessing the quality of *Oncorhynchus mykiss*: Schematic classification

Рисунок. Схематическая классификация методов оценки качества радужной форели

and Russian (eLIBRARY.RU, CyberLeninka) bibliographic databases. A number of older studies were included to describe some individual fundamental aspects.

The keyword search (English and Russian) covered rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss*, fish quality, shelf-life, assessment, targeted methods, non-targeted methods, spectroscopy, rainbow trout, quality, shelf life, targeted methods, non-targeted methods, spectroscopy. The snowballing method made it possible to search the reference lists in the retrieved articles for potentially missed relevant sources. The final pool included peer-reviewed research on rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) quality assessment by conventional (targeted) and advanced non-destructive (non-targeted) methods. The criteria disqualified duplicates, conference abstracts, and studies with flawed methodologies or unrepresentative samples.

The review categorized all reviewed methods into targeted and non-targeted ones for further comparative analysis. Targeted (destructive) methods included conventional approaches: sensory assessment (state-approved protocols); physicochemical parameters, such as K-index, water-holding capacity (WHC), total volatile basic nitrogen (TVB-N), thiobarbituric acid reactive substances (TBARS), and peroxide value (PV); microbiological tests, i.e., total viable count (TVC) and psychrotrophic total count (PTC). Non-targeted (non-destructive) methods included instrumental technologies: various spectroscopy, e.g., mid-infrared spectroscopy (MIR), near-infrared spectroscopy (NIR), Raman spectroscopy, and nuclear magnetic resonance (NMR), as well as hyperspectral imaging (HSI).

The methods were considered effective if they were validated and their results were statistically significant ($p < 0.05$). For non-targeted approaches, effectiveness depended on the availability of a reference targeted assay.

Results and discussion

Targeted methods. Conventional methods for monitoring fish quality deterioration are based on quantitative physicochemical, microbiological, and sensory techniques aimed at assessing various parameters that indicate postmortem changes in fish.

Sensory assessment. It determines the appearance, color, smell, texture, and taste. Its accessibility and simplicity make it the core method for product quality control. Russia and the CIS countries standardize sensory test methods by State Standard (GOST), International Organization for Standardization (ISO), Interstate Standard harmonized with ISO (GOST ISO), and Technical Regulation of the Customs Union (TR CU). The EU and the USA use the Codex Alimentarius (CAC/RCP 52-2003, Revision 4-2008) [7].

Sensory assessment remains the primary and critical method for determining fish freshness. It relies on recording and analyzing the responses of human senses (vision, olfaction, tactile sensations, etc.) to stimuli generated by the product. These stimuli directly correlate

with the biochemical, microbiological, and physical changes in fish tissue.

The texture of fish muscle tissue is a key quality indicator for both raw and cooked salmon. It changes under a combination of various internal factors. These factors include biochemical degradation, e.g., lipid oxidation and proteolysis, and external factors, e.g., refrigeration storage (freezing and thawing) [8].

Colorimetric changes are another marker of fish quality. During refrigeration, muscle tissue loses its color intensity, resulting in pigment degradation, the degree of which depends on temperature and time conditions. Differences in color and appearance are visually noticeable in steaks and fillets.

With prolonged storage, fish loses its consumer properties, and the composition of its volatile compounds changes. As a result, the olfactory properties also change: the characteristic smell fades to be replaced by an unpleasant one, which gradually intensifies. Raw trout has a fresh seaweed or cucumber-like smell, which gradually becomes neutral. Eventually, it turns sour and then putrid due to the formation of short-chain fatty acids, alcohols, sulfur compounds, and amines [9, 10].

For objective recording and quantitative assessment of the described sensory changes in sensory analysis practice, standardized techniques are used. These are traditionally divided into two main approaches: analytical (expert) and consumer. Analytical methods include discriminative and descriptive procedures, as well as assessment using standardized scales and categories. They require specially selected, trained sensory assessors (panelists). In contrast, consumer methods record subjective preferences (likes or dislikes). As such, they involve regular consumers, who are well acquainted with the typical sensory profile of the product in question [11]. The reliability of analytical methods directly depends on the competence of the panelists, who are to be familiar with the system of sensory descriptors and able to work with scales [12].

Studies on rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) clearly demonstrate the sensory changes in progress during refrigerated storage. For instance, M. Azizi *et al.* [13] showed that the quality of untreated fillets (control group) stored at +4°C rapidly deteriorated after ten days of refrigerated storage. Smell and color reached unacceptable levels by day 13, followed by texture on day 16. T. Mehdizadeh *et al.* [14] used a 10-point scale with an acceptability threshold of < 6 points to monitor fillets stored at +4°C. In this case, the overall sensory profile dropped below the acceptable level by day 6. The most drastic decrease belonged to smell and texture, which reached bottom values by day 9. The deterioration of sensory attributes correlated with proliferating psychrotrophic microflora.

While these studies focused on the progress of sensory changes, A. Anbi *et al.* provided a comparative quality assessment at fixed time intervals (15 days of storage).

They used a 10-point scale with an acceptability threshold of ≥ 5 points. The panelists assessed both raw and heat-treated fillets. After 15 days of storage at $+4^{\circ}\text{C}$, the control samples (not treated with a 2% supernatant solution) lost all consumer properties: the scores for smell, taste, texture, and color were 3.0 ± 0.0 points, which was significantly below the acceptability threshold. The panelists recorded negative physiological reactions for both experimental and control samples, which indicated an advanced stage of spoilage and non-compliance with food safety requirements [15].

The method of sensory assessment relies on the human taster as a measuring instrument. Consequently, the subjectivity of individual perception remains a persistent limitation of this method. To minimize this factor and obtain quantitatively comparable data, sensory analysis results are expressed in points. Quality profile is a combination of key criteria (appearance, taste, smell, texture), each of which receives a number of points. The final score is the sum of all points for all criteria. It serves as an objective basis for comparative analysis of different samples [12].

Physicochemical analysis. Various biochemical processes occur in fish muscle tissue during storage under the impact of enzymes and bacteria. These processes form new substances that can serve as a criterion for fish quality. Physicochemical approach to fish quality assessment features total volatile base nitrogen (TVB-N) and other volatile amines, as well as biogenic amines [16, 17]. In addition, fish and seafood contain large amounts of polyunsaturated fatty acids (PUFAs), which makes them more susceptible to oxidation reactions. Peroxide value (PV) and lipid oxidation products, such as thiobarbituric acid-reactive substances (TBARS), are commonly used as freshness indicators [17, 18]. The concentrations of adenosine triphosphate (ATP) and its breakdown products are also reported as an indicator of fish freshness [19].

Free fatty acid content (FFAC) and thiobarbituric acid value (TBA) test. Rainbow trout is an oily fish [20]. Such fish deteriorates as a result of microbial activity and lipid oxidation [21]. Chemical reactions in muscle tissue oxidize and break lipids into simpler compounds, such as free fatty acids, peroxides, and thiobarbituric acid. These processes lead to oxidative rancidity manifested as unpleasant taste and odor. Fatty acid hydroperoxide is a primary product of lipid oxidation; it is measured as the peroxide value (PV). Peroxides are unstable compounds that break down into aldehydes, ketones, and alcohols, i.e., volatile substances that cause unpleasant taste in foods. Freshly caught fish has zero peroxide value. After death, postmortem changes in muscle tissue lead to hydrolysis and fat oxidation. An increase in the peroxide value indicates the formation of peroxides in partially hydrolyzed fat. A decrease in the peroxide value following its peak corresponds to the formation of secondary oxidation products, which marks the end of shelf

life [19]. As reported by M. Rezaei & S. Hosseini, rainbow trout reached its maximum peroxide value on storage day 8 (6.25 mEq/kg), which dropped to 1.28 mEq/kg on day 16 due to the hydroperoxide decomposition [22].

Thiobarbituric acid-reactive substances (TBARS) reveal the degree of secondary lipid oxidation. The upper limit in frozen or chilled fish was reported as 5 mg MDA/kg tissue [8]. Given the increase in values during storage, thiobarbituric acid-reactive substances of trout remained below this limit throughout the storage period (≤ 2 mg MDA/kg fish) [23].

Similarly, the free fatty acid (FFA) content indicates hydrolytic activity caused by lipolytic enzymes. During lipid oxidation and hydrolysis, fish triglycerides break down, leading to an increase in the free fatty acid content. The presence of free fatty acids is undesirable they can be converted into volatile substances that cause unpleasant odor. In rainbow trout, the free fatty acid content was found to rise from 1.50 to 2.89 during 20 days of storage [22]. A Kolakowska *et al.* reported a free fatty acid content of 2.35 in whole trout after 14 days of storage [24]. Thus, a gradual increase in the free fatty acid content reliably indicates a decrease in fish quality.

Trimethylamine (TMA) and total volatile base nitrogen (TVB-N). Total volatile base nitrogen is a popular indicator for determining fish freshness as it reliably correlates with sensory changes during spoilage. In fish and seafood, total volatile base nitrogen is represented mainly by trimethylamine, dimethylamine, and ammonia, as well as other amines. These volatile compounds develop during the microbiological degradation of amino acids, especially in fish muscle tissue [19]. Trimethylamine nitrogen (TMA-N), a volatile amine, is a parameter used to determine the quality and shelf life of salmon fish. It is usually present in spoiled fish and causes an unpleasant odor. Trimethylamine is formed from trimethylamine oxide (TMAO) by the microbial enzyme TMAO reductase. The upper limit of acceptable fish spoilage is 10–15 mg TMA-N/100 g [25–27]. As fish spoils, trimethylamine produces dimethylamine and ammonia. The levels of total volatile base nitrogen and trimethylamine increase in parallel.

The total volatile base nitrogen content in fish tissues depends on the species. Its concentration in freshly caught fish typically ranges from 5 to 20 mg TVB-N/100 g muscle tissue. According to M. Rezaei & S. Hosseini, the values of total volatile base nitrogen in rainbow trout gradually increased during refrigerated storage and reached a maximum value of 29.86 mg/100 g on day 4 [22]. Yet, the total volatile base nitrogen value remained below the upper acceptability limit, which for salmon fish is 35 mg TVB-N/100 g [28]. The method for determining the total volatile base nitrogen level in fish is fairly simple, but this indicator is not informative regarding the early stages of spoilage, since the concentration of volatile nitrogen compounds changes rather slowly during the first days of storage.

K-index. Adenosine triphosphate (ATP) breakdown products are a reliable indicator for assessing fish freshness. Their content remains relatively stable in the muscle tissue of live fish, depending on the species. After death, fish muscles undergo changes caused by the breakdown of adenosine triphosphate into a number of metabolites, including adenosine diphosphate (ADP), adenosine monophosphate (AMP), inosine monophosphate (IMP), inosine, and hypoxanthine [18]. For quality control, inosine and hypoxanthine are the key products of adenosine triphosphate breakdown. Hypoxanthine is the end product of breakdown, and it does not break further in fish. However, such fish species as Pacific salmon demonstrate a different adenosine triphosphate breakdown pattern, when inosine, not hypoxanthine, becomes the main breakdown product. This phenomenon requires further study in freshwater rainbow trout. Most fish species exhibit a decrease in adenosine triphosphate content and an increase in its breakdown products during a certain storage period, which is characterized by the earliest signs of bacterial spoilage. They can be detected both by human senses and by chemical analysis. The adenosine triphosphate breakdown rate in fish depends on the species, the initial state of the raw material, and storage conditions. The nucleotide breakdown rate reliably correlates with the loss of freshness registered by sensory assessment [28]. T. Saito *et al.* [29] proposed a method for assessing the freshness of fish based on the adenosine triphosphate index. It calculates K-index as a percentage of inosine and hypoxanthine in the total amount of adenosine triphosphate and its breakdown products. The lower the K-index, the higher the degree of freshness, and conversely, high K-values indicate low freshness of the fish.

In fresh fish, the K-value remains below 20%. Fish that shows signs of spoilage but is suitable for processing may demonstrate a K-value of 40%. If the value exceeds 60%, the fish is unsuitable for processing [30]. As reported by Y.-T. Cheng [28], the K-value of rainbow trout increased significantly at the end of rigor mortis, regardless of the storage temperature. Moreover, the indicator increased to 61% at 35°C after 14 h of storage, reaching the spoilage level. It rose to 23 and 37% when stored for 4 days at 0 and 4°C, respectively. This coefficient reveals early signs of spoilage in fresh fish when the volatile base nitrogen and trimethylamine nitrogen levels do not yet differ from those of fresh fish. However, K-index does not always correlate with the nitrogen content of volatile bases and trimethylamine in frozen fish, although it objectively reflects its sensory properties [30]. Therefore, frozen fish should be subjected simultaneously to the trimethylamine test as an indicator of microbiological spoilage and the K-index test as an indicator of postmortem changes. In a broad sense, fish freshness depends on several indicators, and determining K-index alone is uninformative. Although, this indicator remains a reliable marker of fish freshness.

Water-holding capacity (WHC) and cook loss (CL).

Water is the main component of fish muscle tissue. It occurs there in both free and bound states, forming stable structured systems with other components. The content and state of water determine the course of biochemical, microbiological, and physical processes that affect the sensory, nutritional, and functional properties of fish during processing and storage [31]. Water-holding capacity and cook loss are the crucial indicators for the state of the aqueous phase and its impact on the quality of the final product.

Water-holding capacity is the ability of structural components of meat proteins to retain their own moisture when exposed to external forces [32]. Due to its composition, fish muscle tissue has a high water-holding capacity, which makes it a pivotal technological parameter that depends on a number of factors. The intensity of tissue exudate (moisture) secretion allows for indirect assessment of structural changes in meat (histological changes, protein denaturation), as well as the condition of muscle fiber membranes, the degree of muscle contraction, and the intensity of mechanical stress.

The water-holding capacity of fresh fish varies depending on the postmortem stage, storage temperature, cutting method, and other conditions. The water-holding capacity of rainbow trout decreases during rigor mortis due to muscle contraction. It continues to decrease as the storage temperature goes up and after filleting [33]. High water-holding capacity correlates with low moisture loss and high protein functionality, which positively affects the appearance, juiciness, and texture. S. Shen *et al.* reported that moisture loss in rainbow trout fillets increased together with storage time at both 3 and –3°C, reaching 2.30 and 4.05%, respectively, by day 6. The higher loss rate at –3°C was associated with the partial freezing of water in muscle tissue. This phenomenon led to partial denaturation of myofibrillar proteins and damage to cell membranes, reducing the water-holding capacity and deteriorating the overall quality [34].

Cook loss is the degradation of taste qualities expressed as a percentage reduction in weight after heat treatment. This important quality indicator reflects not only sensory characteristics (juiciness/dryness, firmness/tenderness, appearance), but also the loss of soluble nutrients, i.e., nutritional value. Cook loss is caused by protein denaturation during heating: myofibrils and collagen fibers shrink while soluble proteins turn to gel. Its value depends on the temperature and time of heat treatment, as well as on the physicochemical properties of the raw material, e.g., the state of muscle proteins, pH, and histological integrity. O. Adebisi [35], who studied rainbow trout fillets, reported that cook loss increased together with storage time. Its values for samples stored for 0, 24, and 48 h after cutting were 11.09 ± 0.52 , 12.40 ± 0.52 , and $12.43 \pm 0.52\%$, respectively. As a re-

sult, the moisture content of the finished product decreased from 69.41% (0 h) to 69.25% (48 h).

Microbiological analysis. Microbial spoilage is responsible for 25–30% loss of fish products [36]. The surface and internal microflora of fresh fish includes mainly psychrophilic microorganisms with an optimal development temperature of about 20°C but capable of multiplying at 0°C [37]. The initial microbiological contamination of freshwater fish depends on the habitat conditions, primarily water temperature. According to literary data for rainbow trout and other fish species (tilapia, striped bass, silver perch), the initial microbial count remains within the range of 10^2 – 10^6 CFU/g [38, 39]. For chilled fish products, this indicator starts from 10^2 CFU/g and increases during storage. According to current regulations, the highest permissible count of mesophilic aerobic and facultative anaerobic microorganisms in chilled and frozen products cannot exceed 10^5 CFU/g [40]. Most of these are Gram-negative bacteria (*Pseudomonas*, *Achromobacter*, *Flavobacterium*, *Cytophaga*), with Gram-positive bacteria represented by *Micrococcus* and *Corynebacterium*. As they proliferate, proteins and fats break down, leading to a gradual deterioration of fish quality. For some catch locations, spore-forming anaerobic microorganisms of the genus *Clostridium* and opportunistic bacteria (*Salmonella enteritidis*, *Escherichia coli*) may also be present [41]. Proteinases secreted by putrefactive bacteria decompose fish tissue proteins, releasing ammonia, hydrogen sulfide, amines, organic acids, and other compounds. As a result of bacterial protein decomposition, toxic breakdown products can accumulate in fish tissue, leading to nonspecific poisoning. Intoxication occurs due to biogenic amines. Most bacteria that produce biogenic amines belong to the *Enterobacteriaceae* family (*Escherichia coli*, *Enterobacter aerogenes*, *Morganella morganii*, *Proteus vulgaris*), as well as to members of the *Clostridium* and *Bacillus* genera [42].

Bacteria of the genus *Pseudomonas* are the major causative agents of fish spoilage. These microorganisms reproduce rapidly, outpacing other bacterial communities. During their life cycle, they produce volatile bases and volatile acids. After just 10 days, pseudomonads account for up to 50% of the total bacterial count and up to 96% after 18 days. *Pseudomonas* cause protein breakdown, developing various volatile compounds, e.g., trimethylamine and odorous gases H_2S and NH_3 . Not only do pseudomonas grow rapidly, but they also exert strong enzymatic activity against proteins and lipids, which makes these bacteria the most responsible for fish spoilage [43].

Microbiological analysis includes the total viable count (TVC), which corresponds to the QMAFAnM indicator, and the psychrotrophic count (PTC). Studies demonstrate the rate of microflora growth on rainbow trout during storage. For fish stored in ice, the total viable count increased from 4.00 to 7.04 log CFU/g

by day 20 [44]. For whole ungutted trout, the surface contamination reached 7.0 log CFU/cm² on day 18 [37]. Considering that the highest permissible total viable count is 10^6 CFU/g (6 log CFU/g), the shelf life of rainbow trout in ice is approximately 9–11 days. During storage of rainbow trout fillets, the initial psychrotrophic count was 2.47 log CFU/g, increasing to 5.98 log CFU/g by day 6 and reaching 7.02 log CFU/g by day 10 [45]. For vacuum-packed trout steaks stored at +3 and +8°C, the psychrotrophic count was 10^6 CFU/g on day 16 and 10^7 CFU/g on Day 18 [46].

Non-targeted methods. The increasing demand for high-quality food products drives the need for more advanced control methods. The list of instrumental methods able to address this challenge includes biochemical, microbiological, physical, and chemical approaches, e.g., chromatography, immunoassay, etc. [19]. However, these methods are, in fact, classified as targeted: they measure such specific parameters as chemical composition, color, lipid and protein oxidation, microbial contamination, etc. They are highly reliable, specific, and sensitive but time-consuming, destructive, expensive, and operator-dependent.

These limitations have redirected research efforts to ward non-destructive technologies, such as optical spectroscopy, hyperspectral imaging, and X-ray diffraction analysis. These advanced techniques provide a reliable alternative to conventional methods of food quality assessment [47]. For instance, vibrational spectroscopy has already established a strong reputation in fish quality assessment. These include the methods of near-infrared (NIR), mid-infrared (MIR), Fourier-transform infrared (FT-IR), and Raman (RS) spectroscopy. In addition to being fast and accurate, these methods provide a large amount of information in a single test, which makes them effective for real-time monitoring and inline control.

Mid-infrared spectroscopy (MIR). Infrared spectroscopy analyzes the way substances interact with electromagnetic radiation in the infrared range. This method is rapidly expanding across food science research. Mid-infrared spectroscopy is highly efficient in assessing the quality of fish and fish products [48]. The mid-infrared spectrum is conventionally divided into four distinct regions: the single-bond stretching vibrations (4000–2500 cm⁻¹), the triple-bond region (2500–2000 cm⁻¹), the double-bond region (2000–1500 cm⁻¹), and the fingerprint region (1500–400 cm⁻¹). Absorption peaks in the mid-infrared spectrum are unique for each type of chemical bond, granting the method exceptional specificity. The most informative spectral ranges for assessing fish freshness are located around 3300–2700 cm⁻¹ and 1800–900 cm⁻¹. These ranges represent absorption bands that correspond to vibrations of the functional groups of proteins and other macromolecules [49]. These bands are associated with the stretching of the C=O bond (1640 cm⁻¹, Amide I band) and the deformation of the N–H bond

(1520–1550 cm^{-1} , Amide II band). The peaks at 1238 cm^{-1} (N–H, C–H deformation vibrations) are connected with Amide III. The lipid-related bands peak at 1458 and 1160 cm^{-1} (CH_2 deformation vibrations, C–O stretching vibrations).

New approaches use mid-infrared spectroscopy to identify the structures of particular organic compounds, such as the secondary structure of proteins. For instance, the Amide I region between 1600 and 1700 cm^{-1} provides information on the α - and β -structure of proteins [50]. These new methods also provide rapid and accurate detection of microorganisms. L. Fengou *et al.* used Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR) to determine the microbiological composition of sea bream (*Sparus aurata*) fillets. In their case, the FT-IR spectra at 3100–2700 and 1800–900 cm^{-1} contained information on biochemical compounds formed as microbial metabolites [51]. Mid-infrared spectroscopy can be applied to identify the structural features of fish muscle proteins as indicators of its nutritional value and sensory properties. It provides an efficient chemical analysis, using characteristic absorption bands in the spectra to evaluate the content and conformation of peptide bonds. Amide I band (1600–1700 cm^{-1}) seems to be the most informative for this purpose as it yields data on the secondary structure of proteins [52].

Mid-infrared spectroscopy was successfully applied to assess the freshness of rainbow trout steaks. D. Vilkovala *et al.* [53] used it to grade trout samples by storage time. The 1700–1500 cm^{-1} range proved to be the most informative as it revealed a clear differentiation in the spectra of samples collected on the first and last days of storage. The absorption intensity in the regions corresponding to amide and amino groups increased progressively over the storage period.

When integrated with multivariate data analysis, mid-infrared spectroscopy can discriminate between chilled or thawed states of raw fish. Absorption band at $\sim 1745 \text{ cm}^{-1}$ characterizes the carbonyl groups of lipids, the $\sim 1525 \text{ cm}^{-1}$ region (Amide II) reflects the presence of the β -sheet structure of proteins, and $\sim 1395 \text{ cm}^{-1}$ is associated with vibrations of carboxyl groups. These spectral features suggest a shift in pH or hydrolytic processes [48].

Spectral data are highly dimensional as each sample is described by hundreds or thousands of spectral variables. These data require multivariate analysis methods for processing and interpretation, e.g., principal component analysis (PCA), hierarchical cluster analysis (HCA), discriminant analysis (DA), and regression methods. These methods simplify complex datasets by reducing dimensionality and separating objects into homogeneous groups [54].

Near-infrared spectroscopy (NIR). It can also be applied to assess fish quality and authenticate fish products. This research method measures the absorption of electromagnetic radiation in the wavelength range from 780 to 2526 nm. This range is conventionally divided into

two regions: short-wavelength (SW-NIR; 780–1100 nm) and long-wavelength (LW-NIR; 1100–2526 nm). The near-infrared spectra record overtones and combination frequencies in vibrations of C–H, N–H, and O–H chemical bonds, which are unique to each sample and provide a reliable chemical analysis. For example, the spectral response of water in the near-infrared region is formed by overtones with maxima at approximately 760; 970; 1180; and 1450 nm, alongside a combination band at $\sim 1940 \text{ nm}$. Characteristic absorption peaks of proteins are observed at 1510; 1980; 2050; and 2180 nm. Bands in the 1100–1390 nm region are associated primarily with stretching vibrations of C–H bonds and their first overtone [55, 56]. Lipids peak at 1722; 1760; 2310; and 2346 nm [57].

Near-infrared spectroscopy is increasingly used in the fishing industry to monitor microbiological spoilage, determine chemical composition, and assess freshness. According to M. Lin *et al.*, shortwave near-infrared spectroscopy (SW-NIR) was able to differentiate between fresh and chilled (≥ 4 days) rainbow trout mince and fillet. Applying principal component analysis (PCA) to the spectral data, the scientists were able to separate one-day-old refrigerated samples from older ones [58]. K. Xu *et al.* [59] used near-infrared spectroscopy to assess the freshness of rainbow trout fillet: the spectra of samples with various degrees of freshness differed significantly at 1500–1530 nm. Based on the near-infrared spectra, the team constructed a linear regression model using the partial least squares (PLS) method. The model demonstrated a high correlation between the experimentally determined and the modeled total volatile basic nitrogen values, confirming the high potential of near-infrared spectroscopy for fish fillet freshness assessment [59].

Near-infrared spectroscopy can be used to detect fraudulent practices in the sea food industry [60]. For instance, N. O'Brien *et al.* applied a portable NIR-spectrometer in combination with principal component analysis and soft independent modeling of class analogy (SIMCA) to discriminate between fish with higher economic value (salmon) and cheaper species (trout) [61].

Most studies on the application of near-infrared spectroscopy in the seafood industry focus on assessing product quality and authenticity while its use in freshness monitoring and early spoilage detection remains a relatively new research field [62]. Several recent studies featured near-infrared spectroscopy as a tool for identifying compounds that determine fish freshness and spoilage microorganisms. For instance, near-infrared spectroscopy was able to measure histamine [60,63], trimethylamine [64], and adenosine triphosphate breakdown products (K-index) [65]. It proved effective in assessing such lipid characteristics as free fatty acid and thiobarbituric acid-reactive substances [66]. Several studies, including those on rainbow trout, attempted to use near-infrared spectroscopy to quantify the microbial load expressed as total viable count [58, 67, 68].

Therefore, infrared spectroscopy is a robust analytical tool of food quality control. However, the near-infrared spectra might be challenging to interpret because they consist of combination bands and overtones of fundamental vibrations (C–H, N–H, O–H). This fact leads to significant band overlap and complicates direct identification of individual compounds. These data require pre-processing by chemometric methods to reduce noise, correct baselines, and separate overlapping signals.

Raman spectroscopy. It is another method of analytical vibrational spectroscopy used to analyze the quality and authenticity of food products. Surface-enhanced Raman scattering (SERS) addresses problems associated with weak Raman scattering. Raman spectroscopy and infrared spectroscopy have similar wavelength regions, which makes them complementary. Vibrations that are clearly visible in the infrared spectrum (strong dipoles) tend to demonstrate low intensity in the Raman spectrum. Furthermore, non-polar functional groups that produce very intense Raman bands typically produce weak infrared signals.

Raman spectroscopy provides information on the secondary and tertiary structure of proteins, as well as on lipid processes, e.g., oxidation and fatty acid hydrolysis [69, 70]. The peak centered at 1655 cm^{-1} is identified as the Amide I band, associated with proteins with a lot of α -helices. Another peak, observed between 1660 and 1680 cm^{-1} , also belongs to Amide I and may be associated with proteins rich in β -sheet or random coil structures. The region between 1200 and 1350 cm^{-1} represents the Amide III band. The bands at 1550 and 1608 cm^{-1} correspond to amino acids, i.e., tryptophan and phenylalanine, respectively [71]. Raman peaks at 1004 , 1160 , 1192 , and 1520 cm^{-1} are associated with carotenoids. Bands observed at 968 , 1065 , 1078 , 1266 , 1300 , 1440 , and 1750 cm^{-1} are markers of lipids [72].

Raman spectroscopy can be used to monitor oxidative changes in fish. According to D. Vilkova *et al.*, Raman spectroscopy is an efficient non-destructive tool for quality and shelf-life assessment of fish fillets. It was able to expose lipid oxidation-related differences between trout fillet samples with different storage periods [73]. Fresh samples (0–3 days) demonstrated the lowest intensity of spectral bands, which allowed for the clear differentiation of these samples from the older ones.

Combined with chemometric analysis, Raman spectroscopy can model the content of omega-3 and omega-6 fatty acids in seafood. E. Prado *et al.* reported that this approach provides high accuracy in predicting the content of polyunsaturated fatty acids, in particular eicosapentaenoic acid (EPA) and docosahexaenoic acid (DHA), in the visceral fat of rainbow trout [74]. A. Hassan *et al.* were able to detect different concentrations of heavy metal ions (mercury, cadmium, lead) in fish because the intensity and area of characteristic spectral peaks increased together with the concentration of metal ions [75].

J. Landry *et al.* [72] used surface-enhanced Raman spectroscopy for rapid quality assessment and authentication of fish samples, and this method provided reliable data for the qualitative and comparative analysis of lipid, protein, and carotenoid composition in fish tissues. Its capacity to identify biochemical markers confirms the significant potential of Raman spectroscopy for aquaculture.

Z. Chen *et al.* [76] reinforced Raman spectroscopy with machine learning algorithms to speed up the detection of rainbow trout imitations of Atlantic salmon: the species had significantly different intensities of characteristic spectral peaks. In particular, the peaks associated with rainbow trout were more intensive than the corresponding bands in salmon.

Surface-enhanced Raman spectroscopy demonstrated strong prospects for entering standard control protocols as a quality assessment method. For instance, E. Witkowska *et al.* [77] demonstrated the feasibility of Raman microspectroscopy for the detection of *Listeria monocytogenes* and *Salmonella* spp. in smoked salmon and other food products. It reduced the pathogen detection time from 6 to 2 days, but the procedure was found too labor-intensive and time-consuming [77, 78].

Raman spectroscopy and surface-enhanced Raman scattering (SERS) are promising tools for fish quality control. However, their practical implementation is hampered by a number of limitations, including low penetration depth, interference of fluorescent background, high equipment costs, and the complexity of spectral data interpretation.

In general, spectroscopy requires a single measurement to provide sufficient information about various classes of compounds that determine product quality. A simultaneous analysis of proteins, lipids, and moisture efficiently traces the processes that have occurred in muscle tissue during storage. This integrated assessment both confirms product spoilage and measures its remaining shelf life.

Hyperspectral imaging (HSI) is a non-invasive technique that combines spectroscopy and imaging into a single system [79]. It provides images with both spatial and spectral data. This combination makes the technique popular in the food industry, where it is used to monitor complex, heterogeneous products. Spectral imaging can be either hyperspectral (HSI) or multispectral (MSI), depending on spectral resolution. Hyperspectral imaging records a signal over a continuous range of wavelengths with a small step, e.g., $400\text{--}1000\text{ nm}$ with a step of 5 nm . Multispectral imaging operates on a discrete set of pre-selected wavelengths, e.g., $400\text{--}1000\text{ nm}$ with a step of 100 nm . As a result, hyperspectral systems generate a significantly larger volume of data per image pixel. Most modern spectral imaging systems operate in the visible and near-infrared range ($400\text{--}2500\text{ nm}$) [80].

Hyperspectral and multispectral imaging techniques are popular in the food industry. Hyperspectral imaging has been applied for the assessment of various seafood

quality attributes, including sensory profile [81], lipid-oxidation secondary products (thiobarbituric acid reactive substances) [82, 83], total volatile basic nitrogen concentration [84], K-index [85], and moisture content [86]. S. Khoshnoudi-Nia & M. Moosavi-Nasab [87] combined hyperspectral imaging at 430–1010 nm with linear and nonlinear models for a more rapid non-destructive measurement of thiobarbituric acid reactive substances in rainbow trout fillets during 12 days of storage at $4 \pm 2^\circ\text{C}$. Shan *et al.* used it to discriminate between fresh and thawed fish [88]. K. Washburn *et al.* used hyperspectral imaging to differentiate between once- and twice-thawed cod: the technique demonstrated significant potential when used as an online method for assessing freeze-thaw cycles of fish [89]. J. Xu *et al.* reported the spectral range of 400–1000 nm as the most informative for classifying salmon samples by freshness [90].

Hyperspectral imaging is a non-invasive measurement for the chemical analysis of seafood, e.g., moisture or fat content. H. Zhang *et al.* accurately determined the fat and moisture content in salmon fillets using near-infrared hyperspectral imaging in the 950–1650 nm range [91]. Blood analysis is another important indicator of fish quality, e.g., M. Skjelvareid *et al.* [92] used hyperspectral imaging to perform a qualitative and quantitative blood analysis of fish fillets.

Hyperspectral imaging can be used to determine the shelf life as a freshness indicator in salmon and other species [93, 94]. S. Khoshnoudi-Nia & M. Moosavi-Nasab integrated hyperspectral imaging with nonlinear chemometric models and obtained accurate modelling of the volatile base nitrogen content, psychrotrophic microbial count, and sensory analysis of rainbow trout fillets over 12 days of storage [81].

Some research teams used hyperspectral imaging to estimate the volatile base nitrogen content of rainbow trout fillets [84] and other fish species [95–97]. All these studies presented accurate models for predicting volatile base nitrogen values using the visible and near-infrared spectral range. For example, M. Moosavi-Nasab *et al.* [84] combined hyperspectral imaging with deep neural networks to obtain highly accurate models of volatile base nitrogen content in rainbow trout fillets across 12 days of storage. These experiments prove the strong potential of hyperspectral imaging for the fish industry.

Both hyperspectral and multispectral imaging methods are highly effective tools for fish analysis. They record images at specific wavelengths in the visible, near-infrared, and mid-infrared ranges, identifying individual features that correlate with various product quality characteristics. Standard methods provide mean values for a homogenized sample, but hyperspectral technology visualizes the spatial distribution of key components (moisture, fat, pigments) directly within muscle tissue. This approach makes it possible to identify localized texture defects, uneven lipid distribution, hemorrhages,

and individual foci of microbiological spoilage, which affect product appearance and quality but often go undetected by standard methods. Yet, the practical implementation of these technologies in the food industry is hampered by the poor availability of commercial and reliable equipment. Moreover, large volumes of generated data remain a serious challenge as they need specialized interpretation algorithms.

Nuclear magnetic resonance (NMR) spectroscopy.

It is a non-destructive analytical technique. It yields comprehensive data on the chemical composition and molecular structure, facilitating reliable and comprehensive qualitative and quantitative profiling. This method is based on the phenomenon of resonant absorption of radiofrequency radiation by atomic nuclei in a magnetic field [98]. Depending on the magnetic field strength, a distinction is made between high-field (≥ 1 T), mid-field (0.5–1 T), and low-field (≤ 0.5 T) nuclear magnetic resonance spectroscopy [98]. The food industry utilizes two complementary approaches. High-resolution nuclear magnetic resonance spectroscopy analyzes the chemical composition and metabolite profile while low-field nuclear magnetic resonance relaxometry defines the state of water and structural changes in tissues [98, 99].

High-resolution nuclear magnetic resonance spectroscopy. It identifies and quantifies individual chemical compounds in complex mixes. In the food industry, it usually targets ^1H , ^{13}C , and ^{31}P nuclei [100]. The fishing industry uses this method to monitor postmortem biochemical changes, determine the metabolic profile, and assess the freshness of raw materials [101]. It can calculate the K-index of freshness based on the concentrations of adenosine triphosphate and its breakdown products.

For instance, Shumilina *et al.* demonstrated the high efficiency of ^1H -NMR spectroscopy in the quality and quantity analysis of metabolites in the muscle tissue of Atlantic salmon (*Salmo salar*) stored at 0 and 4°C [102]. The method made it possible to calculate the K-index of freshness based on the concentrations of adenosine triphosphate, adenosine diphosphate, adenosine monophosphate, inosine monophosphate, inosine, and hypoxanthine without additional chromatographic separations.

L. Abramova *et al.* also used nuclear magnetic resonance spectroscopy for a quantitative analysis of compounds formed during autolytic and bacterial spoilage during storage. They developed several variants of quality index formulas, depending on the type of raw material [103]. The ^1H -NMR method was able to determine a wide range of metabolites, including alanine, acetate, creatine, dimethylamine (DMA), trimethylamine (TMA), trimethylamine-N-oxide (TMAO), glucose, and lactate [104, 105]. The changes of their content mark the key biochemical processes in fish muscle tissue during storage, i.e., autolysis, proteolysis, lipid oxidation, microbiological spoilage, etc. [99].

High-resolution nuclear magnetic resonance spectroscopy also demonstrates a strong potential for assessing

the sensory profile of fish products [103]. The authors applied it to assess the taste profile of Atlantic salmon during heat treatment and storage [103]. Based on the quantitative analysis of free amino acids, nucleotides, and organic acids, the authors calculated the taste index (TI) for the major compounds responsible for sweet, bitter, sour, and umami tastes.

High-resolution nuclear magnetic resonance spectroscopy can be used to discriminate between fresh and thawed fish. K. Kaltenbach *et al.* combined this method with multivariate data analysis (principal component analysis followed by linear discriminant analysis, PCA-LDA) to achieve a classification accuracy of 90.0% in the lipid analysis of trout samples [106].

Some publications report the high prospects of high-resolution nuclear magnetic resonance spectroscopy for the metabolomic analysis of rainbow trout muscle tissue. Roques *et al.* used this method to study metabolic changes that occurred when they replaced fishmeal in feed with alternative sources. The result was a wide range of water-soluble metabolites in muscle tissue [107].

P. Gunnarsson *et al.* combined it with sensory analysis to study the effect of various protein feeds (insects, micromycetes, mollusks) on β -alanine, creatine, and amino acids in rainbow trout [108]. The changes, however, did not affect the sensory properties of the fish.

All these studies demonstrate the efficacy of high-resolution nuclear magnetic resonance spectroscopy for a comprehensive assessment of trout quality as it captures the impact of dietary and environmental factors on both fish metabolism and end-product consumer properties.

Nuclear magnetic resonance relaxometry. Unlike spectroscopy, it focuses on the physical state of a substance, primarily the mobility of water and lipids in biological tissues [99]. The method measures the relaxation times (T_1 and T_2) of protons, which characterize the distribution of water across different fractions, i.e., bound water (strongly associated with macromolecules), immobilized (structural) water, and free water. The method provides real-time monitoring of water migration and the changes in its mobility during storage, freezing, thawing, and heat treatment.

A significant correlation exists between the relaxation parameters and such technological indicators as water-holding capacity and cook losses [98]. Nuclear magnetic resonance relaxometry can be used to develop express methods for monitoring the thermal state of raw fish. It was successfully applied to assess the effect of heat treatment on fish quality [109].

The method is officially recognized by regulatory documentation for food quality and safety: Methodological Guidelines MUK 4.3.3551-19 determine the quality of chilled fish products by nuclear magnetic resonance relaxometry.

M. Zhao *et al.* [110] used nuclear magnetic resonance relaxometry to assess the quality of rainbow trout

during storage. The authors focused on the effect of transport-induced heat stress on the proton relaxation times in trout fillets during refrigerated storage (4°C). The proportion of free water increased throughout storage, especially in the samples subjected to heat stress, while the proportion of immobilized water decreased. These changes correlated with the accumulation of total volatile basic nitrogen and malondialdehyde, as well as a progressive rise in the K-index. This method made it possible to differentiate the fish samples based on their shelf life. In addition, the authors evaluated the efficacy of ascorbic acid against adverse changes in water fractions and spoilage indicators [110].

The synergy of nuclear magnetic resonance spectroscopy and relaxometry provides a comprehensive quality assessment of fish products. Spectroscopy yields high-resolution data on chemical changes (metabolomic approach, K-index, flavor compounds) while relaxometry reveals the structural and mechanical changes, as well as water mobility and distribution. These methods provide highly reproducible results and require minimal sample preparation. Combined with chemometric methods, they possess an enormous potential for real-time quality control of fish products.

Conclusion

Conventional quality control of fish and fish raw materials combines sensory, physicochemical, and microbiological methods. Despite their high reliability, these targeted approaches are time-consuming, destructive, and operator-dependent, which significantly curbs their use for operational monitoring. These shortcomings stimulate the development of non-targeted (instrumental) analytical methods.

Using the case of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) and some other fish species, this review proved the effectiveness of mid-infrared and near-infrared spectroscopy, Raman spectroscopy and surface-enhanced Raman scattering, spectral imaging, and nuclear magnetic resonance spectroscopy in the fish industry. They provide rapid assessment of freshness and shelf life while being able to differentiate raw materials based on pre-treatment methods, e.g., chilled or thawed fish. They offer effective authentication tools able to detect species substitution. In addition, they can determine indirect biochemical spoilage markers, e.g., total volatile basic nitrogen, lipid oxidation products, and K-index. Non-invasive by nature, these methods can be automated and integrated into online monitoring systems.

However, the implementation of spectroscopic approach in the fish industry is hampered by a number of methodological challenges. For instance, these methods are highly sensitive to sample heterogeneity and require robust calibration using representative datasets for each species. Moreover, they need advanced statistical data processing methods to identify hidden patterns and construct species-specific predictive models.

As a highly valuable aquaculture species, rainbow trout represents a relevant model for demonstrating the capabilities and limitations of modern instrumental methods. Further progress in operational quality control is associated with new analytical protocols that combine spectroscopic platforms with optimized chemometric algorithms targeting specifically this raw material.

Contribution

All the authors participated equally in the study design, manuscript preparation, and final editing.

Conflict of interest

The authors declared no conflict of interest regarding the publication of this article.

Критерии авторства

Авторы в равной степени принимали участие в исследовании, написании и оформлении рукописи.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

References / Список литературы

1. Ashraf SA, Adnan M, Patel M, Siddiqui AJ, Sachidanandan M, *et al.* Fish-Based bioactives as potent nutraceuticals: Exploring the therapeutic perspective of sustainable food from the sea. *Marine Drugs*. 2020;18(5):265. <https://doi.org/10.3390/md18050265>
2. FAO. The state of world fisheries and aquaculture 2024. Rome: FAO; 2024. 264 p. <https://doi.org/10.4060/cd0683en>
3. Belova MA, Fonyakina VS, Shter KV, Nikitin IA, Novichenko OV, *et al.* Rainbow trout aquaculture: Global trends, Russian practice and regional development prospects. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Fishing industry*. 2025;(2): 141–150. (In Russ.). [Белова М. А., Фонякина В. С., Штер К. В., Никитин И. А., Новиченко О. В. и др. Аквакультура радужной форели: мировые тенденции, Российская практика и региональные перспективы развития. Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Рыбное хозяйство. 2025. № 2. С. 141–150.] <https://doi.org/10.24143/2073-5529-2025-2-141-150>
4. Aas TS, Åsgård T, Ytrestøyl T. Chemical composition of whole body and fillet of slaughter sized Atlantic salmon (*Salmo salar*) and rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) farmed in Norway in 2020. 2022;25:101252. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2022.101252>
5. Snyder H. Literature review as a research methodology: An overview and guidelines. *Journal of Business Research*. 2019;104:333–339. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2019.07.039>
6. Torracco RJ. Writing integrative reviews of the literature: Methods and purposes. *International Journal of Adult Vocational Education and Technology*. 2016;7(3):62–70. <https://doi.org/10.4018/IJAVET.2016070106>
7. FAO. Codex Alimentarius Commission. Procedural Manual 24th ed. Rome: FAO; 2015. 242 p.
8. Vilkova D, Kondratenko E, Chèné C, Karoui R. Effect of multiple freeze–thaw cycles on the quality of Russian sturgeon (*Acipenser gueldenstaedtii*) determined by traditional and emerging techniques. *European Food Research and Technology*. 2022;248:95–107. <https://doi.org/10.1007/s00217-021-03859-y>
9. Alizadeh E, Chapleau N, Lamballerie de M, Le-Bail A. Effect of different freezing processes on the microstructure of Atlantic salmon (*Salmo salar*) fillets. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 2007;8(4):493–499. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2006.12.003>
10. Chen YW, Cai WQ, Shi YG, Dong XP, Bai F, *et al.* Effects of different salt concentrations and vacuum packaging on the shelf-stability of Russian sturgeon (*Acipenser gueldenstaedti*) stored at 4 °C. *Food Control*. 2020;109:106865. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2019.106865>
11. Dolganova NV, Pershina EV, Khasanova ZK. Microbiology of fish and fish products. St. Petersburg: Lan; 2012. 288 p. (In Russ.). [Долганова Н. В., Першина Е. В., Хасанова З. К. Микробиология рыбы и рыбных продуктов. СПб.: Лань, 2012. 288 с.]
12. Sytova MV. Methodological approaches to assessing the quality of food fish products using sensory analysis: A scientific review. *Proceedings of VNIRO*. 2023;191:124–141. (In Russ.). [Сытова М. В. Методические подходы к оценке качества пищевой рыбной продукции с использованием сенсорного анализа: научный обзор. Труды ВНИРО. 2023. Т. 191. С. 124–141.] <https://doi.org/10.36038/2307-3497-2023-191-124-141>
13. Azizi M, Jahanbin K, Shariatifar N. Evaluation of whey protein coating containing nanoliposome dill (*Anethum graveolens* L.) essential oil on microbial, physicochemical and sensory changes of rainbow trout fish. *Food Chemistry: X*. 2024;21:101110. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2023.101110>
14. Mehdizadeh T, Tajik H, Poushi MK. Effects of a chitosan edible coating containing pomegranate peel extract, nisin, and citric acid on the microbiological, chemical, and sensory characteristics of vacuum-packed rainbow trout fillets. *Applied Food Research*. 2025;5(2):101308. <https://doi.org/10.1016/j.afres.2025.101308>
15. Anbi AA, Razavilar V, Naghadehi MN, Osalou YIA. The effects of *Lactococcus lactis* subsp. *lactis* and its supernatant on some bacteriological and sensory values in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) fillets. *Microbiology Research*. 2018;9(1):7431. <https://doi.org/10.4081/mr.2018.7431>

16. Amaral RA, Pinto CA, Lima V, Tavares J, Martins AP, et al. Chemical-based methodologies to extend the shelf life of fresh fish – a review. *Foods*. 2021;10(10):2300. <https://doi.org/10.3390/foods10102300>
17. Hong H, Luo Y, Zhou Z, Shen H. Effects of low concentration of salt and sucrose on the quality of bighead carp (*Aristichthys nobilis*) fillets stored at 4 °C. *Food Chemistry*. 2012;133(1):102–107. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.01.002>
18. Cheng J-H, Dai Q, Sun D-W, Zeng X-A, Liu D, et al. Applications of non-destructive spectroscopic techniques for fish quality and safety evaluation and inspection. *Trends in Food Science & Technology*. 2013;34(1):18–31. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2013.08.005>
19. Hassoun A, Karoui R. Quality evaluation of fish and other seafood by traditional and nondestructive instrumental methods: Advantages and limitations. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2017;57(9):1976–1998. <https://doi.org/10.1080/10408398.2015.1047926>
20. Venugopal V, Shahidi F. Structure and composition of fish muscle. *Food Reviews International*. 1996;12(2):175–197. <https://doi.org/10.1080/87559129609541074>
21. Gram L, Wedell-Neergaard C, Huss HH. The bacteriology of fresh and spoiling Lake Victorian Nile perch (*Lates niloticus*). *International Journal of Food Microbiology*. 1990;10(3–4):303–316. [https://doi.org/10.1016/0168-1605\(90\)90077-I](https://doi.org/10.1016/0168-1605(90)90077-I)
22. Rezaei M, Hosseini SF. Quality assessment of farmed rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) during chilled storage. *Journal of Food Science*. 2008;73(6):H93–H96. <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2008.00792.x>
23. Rostamzad H, Shabanpour B, Kashaninejad M, Shabani A. Antioxidative activity of citric and ascorbic acids and their preventive effect on lipid oxidation in frozen Persian sturgeon fillets. *Latin American Applied Research*. 2011;41(2):135–140.
24. Kołakowska A, Zienkiewicz L, Domiszewski Z, Bienkiewicz G. Lipid changes and sensory quality of whole- and gutted rainbow trout during storage in ice. *Acta Ichthyologica et Piscatoria*. 2006;36(1):39–47. <https://doi.org/10.3750/AIP2006.36.1.06>
25. Kykkidou S, Giatrakou V, Papavergou A, Kontominas MG, Savvaidis IN. Effect of thyme essential oil and packaging treatments on fresh Mediterranean swordfish fillets during storage at 4 °C. *Food Chemistry*. 2009;115(1):169–175. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.11.083>
26. Kostaki M, Giatrakou V, Savvaidis IN, Kontominas MG. Combined effect of MAP and thyme essential oil on the microbiological, chemical and sensory attributes of organically aquacultured sea bass (*Dicentrarchus labrax*) fillets. *Food Microbiology*. 2009;26(5):475–482. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2009.02.008>
27. Li X, Li J, Zhu J, Wang Y, Fu L, et al. Postmortem changes in yellow grouper (*Epinephelus awoara*) fillets stored under vacuum packaging at 0 °C. *Food Chemistry*. 2011;126(3):896–901. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.11.071>
28. Cheng Y-T, Huang P-H, Lu W-C, Chu S-C, Wang P-M, et al. Creating added-value filet product from rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) by salting and smoking method: Physicochemical and textural attributes. *Frontiers in Sustainable Food Systems*. 2023;7:1153862. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2023.1153862>
29. Saito T, Arai KI, Matsuyoshi M. A new method for estimating the freshness of fish. *Nippon Suisan Gakkaishi*. 1959;24(9):749–750. <https://doi.org/10.2331/suisan.24.749>
30. Bubyr IV. Raw materials and materials of the fishing industry. Pinsk: PolesSU; 2020. 237 p. (In Russ.). [Бубырь И. В. Сырье и материалы рыбной промышленности. Пинск: ПолесГУ, 2020. 237 с.] <https://rep.polesu.by/handle/123456789/17763>
31. Vilkova D, Chéné C, Kondratenko E, Karoui R. A comprehensive review on the assessment of the quality and authenticity of the sturgeon species by different analytical techniques. *Food Control*. 2022;133:108648. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2021.108648>
32. Cheng Y-T, Huang P-H, Lu W-C, Chu S-C, Wang P-M, et al. Physicochemical properties of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) filet treated with high-voltage electrostatic field under different storage temperatures. *Frontiers in Sustainable Food Systems*. 2023;7:1158953. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2023.1158953>
33. Chan SS, Roth B, Jessen F, Jakobsen AN, Lerfall J. Water holding properties of *Atlantic salmon*. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 2022;21(1):477–498. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12871>
34. Shen S, Jiang Y, Liu X, Luo Y, Gao L. Quality assessment of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) fillets during super chilling and chilled storage. *Journal of Food Science and Technology*. 2015;52(8):5204–5211. <https://doi.org/10.1007/s13197-014-1539-8>
35. Adebisi OE. Effect of rigor state, when processed, on rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) fillet quality. *Graduate Theses, Dissertations, and Problem Reports*. 2012;1–89.
36. Hassoun A, Çoban ÖE. Essential oils for antimicrobial and antioxidant applications in fish and other seafood products. *Trends in Food Science & Technology*. 2017;68:26–36. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.07.016>
37. Chytiri S, Chouliara I, Savvaidis IN, Kontominas MG. Microbiological, chemical and sensory assessment of iced whole and filleted aquacultured rainbow trout. *Food Microbiology*. 2004;21(2):157–165. [https://doi.org/10.1016/S0740-0020\(03\)00059-5](https://doi.org/10.1016/S0740-0020(03)00059-5)
38. Acuff G, Izat AL, Finne G. Microbial flora of pond-reared tilapia (*Tilapia aurea*) held on ice. *Journal of Food Protection*. 1984;47(10):778–780. <https://doi.org/10.4315/0362-028X-47.10.778>

39. Gelman A, Glatman L, Drabkin V, Harpaz S. Effects of storage temperature and preservative treatment on shelf life of the pond-raised freshwater fish, silver perch (*Bidyanus bidyanus*). Journal of Food Protection. 2001;64(10):1584–1591. <https://doi.org/10.4315/0362-028X-64.10.1584>
40. Roberts T, Schothorst van M, Sharpe A, BairdParker A, Bryan F, *et al.* The international commission on microbiological specification for foods (ICMSF). Food Control. 1996;7(2):99–101.
41. Bliznyuk UA, Borchegovskaya PU, Ipatova VS, Leontyev VA, Studenikin FR, *et al.* Low-energy accelerated electron treatment on chilled trout. Federal State Budgetary Scientific Institution: Proceedings Intern. Sci. Conf. Modern Problems of Radiobiology, Radioecology and Agroecology. Obninsk, 2019;254–257. (In Russ.). [Близнюк У. А., Борщеговская П. Ю., Ипатова В. С., Леонтьев В. А., Студеникин Ф. Р. и др. Радиационная обработка охлажденной форели низкоэнергетичными электронами: материалы Междунар. молодежной конф. «Современные проблемы радиобиологии, радиозкологии и агроэкологии». Обнинск, 2019. С. 254–257.] <https://elibrary.ru/FXOEPH>
42. Diachkova AV, Tikhonova NV. Preservation of freshness and shelf life extension of perishable products (meat and fish) in vacuum packaging by experimental hydrostat. Food Industry. 2019;4(3):22–33. <https://doi.org/10.29141/2500-1922-2019-4-3-3>
43. Alshevskaya MN. Scientific foundations of technological processes. Kaliningrad: KSTU Federal State Budgetary Educational Institution; 2022. 267 p. (In Russ.). [Альшевская М. Н. Научные основы технологических процессов. Калининград: ФГБОУ ВО «КГТУ», 2022. 276 с.]
44. Rezaei M, Montazeri N, Langrudi HE, Mokhayer B, Parviz M, *et al.* The biogenic amines and bacterial changes of farmed rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) stored in ice. Food Chemistry. 2007;103(1):150–154. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2006.05.066>
45. Ucak İ, Khalily R, Abuibaid A, Ogunkalu O. Maintaining the quality of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) fillets by treatment of red onion peel extract during refrigerated storage. Progress in Nutrition. 2018;20(4):672–678. <https://doi.org/10.23751/pn.v20i4.7690>
46. Lyhs U, Lahtinen J, Fredriksson-Ahomaa M, Hyytiä-Trees E, Elfing K, *et al.* Microbiological quality and shelf-life of vacuum-packaged 'gravad' rainbow trout stored at 3 and 8 °C. International Journal of Food Microbiology. 2001;70(3):221–230. [https://doi.org/10.1016/S0168-1605\(01\)00548-7](https://doi.org/10.1016/S0168-1605(01)00548-7)
47. Kumar Y, Karne SC. Spectral analysis: A rapid tool for species detection in meat products. Trends in Food Science & Technology. 2017;62:59–67. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.02.008>
48. Vilkova D, Sangaré M, Egorov M, Karoui R. Mid-infrared spectroscopy enabled rapid differentiation between fresh and frozen-thawed Sevruga (*Acipenser stellatus*) samples presenting different raw quality. European Food Research and Technology. 2023;249(9):2299–2310. <https://doi.org/10.1007/s00217-023-04290-1>
49. Saraiva C, Vasconcelos H, Almeida de JMM. A chemometrics approach applied to Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) for monitoring the spoilage of fresh salmon (*Salmo salar*) stored under modified atmospheres. International Journal of Food Microbiology. 2017;241:331–339. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2016.10.038>
50. Haris PI, Severcan F. FTIR spectroscopic characterization of protein structure in aqueous and non-aqueous media. Journal of Molecular Catalysis B: Enzymatic. 1999;7(1–4):207–221. [https://doi.org/10.1016/S1381-1177\(99\)00030-2](https://doi.org/10.1016/S1381-1177(99)00030-2)
51. Fengou LC, Lianou A, Tsakanikas P, Gkana EN, Panagou EZ, *et al.* Evaluation of Fourier transform infrared spectroscopy and multispectral imaging as means of estimating the microbiological spoilage of farmed sea bream. Food Microbiology. 2019;79:27–34. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2018.10.020>
52. Karoui R. Spectroscopic technique: Mid-Infrared (MIR) and Fourier Transform Mid-Infrared (FT-MIR) spectroscopies. In: Sun DW, editor. Modern techniques for food authentication. 2nd ed. New York: Academic Press; 2018. p. 23–78. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814264-6.00002-5>
53. Vilkova D, Novichenko O, Belova M, Kutuzov M, Nikitin I. Infrared spectroscopy as a rapid method the assessment of the shelf-life and freshness of refrigerated rainbow trout. Storage and Processing of Farm Products. 2024;32(1):85–94. (In Russ.). [Вилкова Д. Д., Новиченко О. В., Белова М. А., Кутузов М. Н., Никитин И. А. Инфракрасная спектроскопия как метод экспресс-оценки сроков хранения и свежести охлажденной радужной форели. Хранение и переработка сельхозсырья. 2024. № 1. С. 85–94.] <https://doi.org/10.36107/spfp.2024.1.558>
54. Boughattas F, Vilkova D, Kondratenko E, Karoui R. Targeted and untargeted techniques coupled with chemometric tools for the evaluation of sturgeon (*Acipenser gueldenstaedtii*) freshness during storage at 4 °C. Food Chemistry. 2020;312:126000. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.126000>
55. Downey G. Non-invasive and non-destructive percutaneous analysis of farmed salmon flesh by near infra-red spectroscopy. Food Chemistry. 1996;55(3):305–311. [https://doi.org/10.1016/0308-8146\(95\)00118-2](https://doi.org/10.1016/0308-8146(95)00118-2)
56. Khodabux K, L'Omelette MSS, Jhaumeer-Laulloo S, Ramasami P, Rondeau P. Chemical and near-infrared determination of moisture, fat and protein in tuna fishes. Food Chemistry. 2007;102(3):669–675. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2006.05.057>
57. McClure WF, Stanfield DL. Near-infrared spectroscopy of biomaterials. In: Chalmers JM, Griffiths PR, editors. Handbook of vibrational spectroscopy. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd; 2006. <https://doi.org/10.1002/0470027320.s0107>

58. Lin M, Mousavi M, Al-Holy M, Cavinato AG, Rasco BA. Rapid near infrared spectroscopic method for the detection of spoilage in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) fillet. Journal of Food Science. 2006;71(1):S18–S23. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2006.tb12400.x>
59. Xu K, Yi Y, Deng J, Wang Y, Zhao B, et al. Evaluation of the freshness of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) fillets by the NIR, E-nose and SPME-GC-MS. RSC Advances. 2022;12(19):11591–11603. <https://doi.org/10.1039/d2ra00038e>
60. Ghidini S, Varrà MO, Zanardi E. Approaching authenticity issues in fish and seafood products by qualitative spectroscopy and chemometrics. Molecules. 2019;24(9):1812. <https://doi.org/10.3390/molecules24091812>
61. O'Brien N, Hulse CA, Pfeifer F, Siesler HW. Near infrared spectroscopic authentication of seafood. Journal of Near Infrared Spectroscopy. 2013;21(4):299–305. <https://doi.org/10.1255/jnirs.1063>
62. Qu JH, Liu D, Cheng JH, Sun DW, Ma J, et al. Applications of near-infrared spectroscopy in food safety evaluation and control: A review of recent research advances. Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 2015;55(13):1939–1954. <https://doi.org/10.1080/10408398.2013.871693>
63. Pochanagone S, Rittiron R. Preliminary study on the determination of ppm-level concentration of histamine in tuna fish using a dry extract system for infrared coupled with near-infrared spectroscopy. ACS Omega. 2019;4(21):19164–19171. <https://doi.org/10.1021/acsomega.9b02438>
64. Agyekum AA, Kutsanedzie FYH, Mintah BK, Annavaram V, Zareef M, et al. Rapid and nondestructive quantification of trimethylamine by FT-NIR coupled with chemometric techniques. Food Analytical Methods. 2019;12(9):2035–2044. <https://doi.org/10.1007/s12161-019-01537-0>
65. Ding R, Huang X, Han F, Dai H, Teye E, et al. Rapid and nondestructive evaluation of fish freshness by near infrared reflectance spectroscopy combined with chemometrics analysis. Analytical Methods. 2014;6(24):9675–9683. <https://doi.org/10.1039/C4AY01839G>
66. Karlsdottir MG, Arason S, Kristinsson HG, Sveinsdottir K. The application of near infrared spectroscopy to study lipid characteristics and deterioration of frozen lean fish muscles. Food Chemistry. 2014;159:420–427. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.03.050>
67. Tito NB, Rodemann T, Powell SM. Use of near infrared spectroscopy to predict microbial numbers on Atlantic salmon. Food Microbiology. 2012;32(2):431–436. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2012.07.009>
68. Duan C, Chen C, Khan MN, Liu Y, Zhang R, Lin H, et al. Non-destructive determination of the total bacteria in flounder fillet by portable near infrared spectrometer. Food Control. 2014;42:18–22. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2014.01.023>
69. Kobayashi Y, Mayer SG, Park JW. FT-IR and Raman spectroscopies determine structural changes of tilapia fish protein isolate and surimi under different comminution conditions. Food Chemistry. 2017;226:156–164. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.01.068>
70. Kunyaboon S, Thumanu K, Park JW, Khongla C, Yongsawatdigul J. Evaluation of lipid oxidation, volatile compounds and vibrational spectroscopy of silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) during ice storage as related to the quality of its washed mince. Foods. 2021;10(3):495. <https://doi.org/10.3390/foods10030495>
71. Movasaghi Z, Rehman S, Rehman IU. Raman Spectroscopy of Biological Tissues. Applied Spectroscopy Reviews. 2007;42(5):493–541. <https://doi.org/10.1080/05704920701551530>
72. Landry JD, Torley PJ, Blanch EW. Detection of biomarkers relating to quality and differentiation of some commercially significant whole fish using spatially off-set raman spectroscopy. Molecules. 2020;25(17):3776. <https://doi.org/10.3390/molecules25173776>
73. Vilkova DD, Belova MA, Kutuzov MN, Novichenko OV, Shter KV, et al. The potential of raman spectroscopy as a rapid method for monitoring shelf life and freshness of refrigerated rainbow trout fillet. Storage and Processing of Farm Products. 2025;33(1):161–171. (In Russ.). [Вилкова Д. Д., Белова М. А., Кутузов М. Н., Новиченко О. В., Штер К. В. и др. Потенциал рамановской спектроскопии как метода экспресс-оценки срока хранения и свежести филе охлажденной радужной форели. Хранение и переработка сельхозсырья. 2025. Т. 33. № 1. С. 161–171.] <https://doi.org/10.36107/spfp.2025.1.627>
74. Prado E, Eklouh-Molinier C, Enez F, Causeur D, Blay C, et al. Prediction of fatty acids composition in the rainbow trout *Oncorhynchus mykiss* by using Raman micro-spectroscopy. Analytica Chimica Acta. 2022;1191:339212. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2021.339212>
75. Hassan AHA, Zeinhom MMA, Shaban M, Korany AM, Gamal A, et al. Rapid and sensitive in situ detection of heavy metals in fish using enhanced Raman spectroscopy. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy. 2024;313:124082. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2024.124082>
76. Chen Z, Wu T, Xiang C, Xu X, Tian X. Rapid identification of rainbow trout adulteration in Atlantic salmon by raman spectroscopy combined with machine learning. Molecules. 2019;24(15):2851. <https://doi.org/10.3390/molecules24152851>
77. Witkowska E, Korsak D, Kowalska A, Książkowska-Gocalska M, Niedziółka-Jönsson J, et al. Surface-enhanced Raman spectroscopy introduced into the International Standard Organization (ISO) regulations as an alternative method for detection and identification of pathogens in the food industry. Analytical and Bioanalytical Chemistry. 2017;409(6):1555–1567. <https://doi.org/10.1007/s00216-016-0090-z>

78. Assaf A, Cordella CBY, Thouand G. Raman spectroscopy applied to the horizontal methods ISO 6579:2002 to identify *Salmonella* spp. in the food industry. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*. 2014;406(20):4899–4910. <https://doi.org/10.1007/s00216-014-7909-2>
79. Su WH, Sun DW. Multispectral imaging for plant food quality analysis and visualization. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 2018;17(1):220–239. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12317>
80. Roberts J, Power A, Chapman J, Chandra S, Cozzolino D. A short update on the advantages, applications and limitations of hyperspectral and chemical imaging in food authentication. *Applied Sciences*. 2018;8(4):505. <https://doi.org/10.3390/app8040505>
81. Khoshnoudi-Nia S, Moosavi-Nasab M. Prediction of various freshness indicators in fish fillets by one multispectral imaging system. *Scientific Reports*. 2019;9:14704. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-51264-z>
82. Xu J-L, Riccioli C, Sun D-W. Efficient integration of particle analysis in hyperspectral imaging for rapid assessment of oxidative degradation in salmon fillet. *Journal of Food Engineering*. 2016;169:259–271. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2015.08.015>
83. Cheng J-H, Sun D-W, Qu J-H, Pu H-B, Zhang X-C, *et al.* Developing a multispectral imaging for simultaneous prediction of freshness indicators during chemical spoilage of grass carp fish fillet. *Journal of Food Engineering*. 2016;182:9–17. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2016.02.004>
84. Moosavi-Nasab M, Khoshnoudi-Nia S, Azimifar Z, Kamyab S. Evaluation of the total volatile basic nitrogen (TVB-N) content in fish fillets using hyperspectral imaging coupled with deep learning neural network and meta-analysis. *Scientific Reports*. 2021;11:5094. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-84659-y>
85. Shi C, Qian J, Zhu W, Liu H, Han S, *et al.* Nondestructive determination of freshness indicators for tilapia fillets stored at various temperatures by hyperspectral imaging coupled with RBF neural networks. *Food Chemistry*. 2019;275:497–503. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.09.092>
86. Temiz HT, Ulaş B. A review of recent studies employing hyperspectral imaging for the determination of food adulteration. *Photochem*. 2021;1(2):125–146. <https://doi.org/10.3390/photochem1020008>
87. Khoshnoudi-Nia S, Moosavi-Nasab M. Comparison of various chemometric analysis for rapid prediction of thiobarbituric acid reactive substances in rainbow trout fillets by hyperspectral imaging technique. *Food Science & Nutrition*. 2019;7(5):1875–1883. <https://doi.org/10.1002/fsn3.1043>
88. Shan J, Wang X, Russel M, Zhao J, Zhang Y. Comparisons of fish morphology for fresh and frozen-thawed crucian carp quality assessment by hyperspectral imaging technology. *Food Analytical Methods*. 2018;11(6):1701–1710. <https://doi.org/10.1007/s12161-018-1158-5>
89. Washburn KE, Stormo SK, Skjelvareid MH, Heia K. Non-invasive assessment of packaged cod freeze-thaw history by hyperspectral imaging. *Journal of Food Engineering*. 2017;205:64–73. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.02.025>
90. Xu J, Riccioli C, Sun D-W. Comparison of hyperspectral imaging and computer vision for automatic differentiation of organically and conventionally farmed salmon. *Journal of Food Engineering*. 2017;196:170–182. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2016.10.021>
91. Zhang H, Zhang S, Chen Y, Luo W, Huang Y, *et al.* Non-destructive determination of fat and moisture contents in Salmon (*Salmo salar*) fillets using near-infrared hyperspectral imaging coupled with spectral and textural features. *Journal of Food Composition and Analysis*. 2020;92:103567. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2020.103567>
92. Skjelvareid MH, Heia K, Olsen SH, Stormo SK. Detection of blood in fish muscle by constrained spectral unmixing of hyperspectral images. *Journal of Food Engineering*. 2017;212:252–261. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.05.029>
93. Sivertsen A, Kimiya T, Heia K. Automatic freshness assessment of cod (*Gadus morhua*) fillets by Vis/Nir spectroscopy. *Journal of Food Science*. 2011;76(6):S356–S363. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2010.10.030>
94. Kimiya T, Sivertsen AH, Heia K. VIS/NIR spectroscopy for non-destructive freshness assessment of Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) fillets. *Journal of Food Engineering*. 2013;116(3):758–764. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.01.008>
95. Cheng J-H, Sun D-W, Zeng X-A, Pu H-B. Non-destructive and rapid determination of TVB-N content for freshness evaluation of grass carp (*Ctenopharyngodon idella*) by hyperspectral imaging. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 2014;21:179–187. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2013.10.013>
96. Cheng J-H, Sun D-W, Wei Q. Enhancing visible and near-infrared hyperspectral imaging prediction of TVB-N level for fish fillet freshness evaluation by filtering optimal variables. *Food Analytical Methods*. 2017;10(6):1888–1898. <https://doi.org/10.1007/s12161-016-0742-9>
97. Yu H-D, Qing L-W, Yan D-T, Xia G, Zhang C, *et al.* Hyperspectral imaging in combination with data fusion for rapid evaluation of tilapia fillet freshness. *Food Chemistry*. 2021;348:129129. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129129>
98. Wang X-Y, Xie J, Chen X-J. Applications of non-invasive and novel methods of low-field nuclear magnetic resonance and magnetic resonance imaging in aquatic products. *Frontiers in Nutrition*. 2021;8:651804. <https://doi.org/10.3389/fnut.2021.651804>
99. Hatzakis E. Nuclear Magnetic Resonance (NMR) Spectroscopy in food science: A comprehensive review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 2019;18:189–220. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12408>

100. Hwang H-S. Advances in NMR spectroscopy for lipid oxidation assessment. Cham: Springer, 2017. 59 p.
101. Abramova LS, Kozin AV. Assessment of the nutrient and metabolic profile of the Chum salmon (*Oncorhynchus keta*). Applied Biochemistry and Microbiology 2024;60(1):90–100. (In Russ.). [Абрамова Л. С., Козин А. В. Оценка нутриентного и метаболического профиля кеты тихоокеанской (*Oncorhynchus keta*). Прикладная биохимия и микробиология. 2024. Т. 60. № 1. С. 90–100.] <https://doi.org/10.31857/S0555109924010109>
102. Shumilina E, Ciampa A, Capozzi F, Rustad T, Dikiy A. NMR approach for monitoring post-mortem changes in Atlantic salmon fillets stored at 0 and 4°C. Food Chemistry. 2015;184:12–22. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.03.037>
103. Abramova LS, Kozin AV, Guseva ES, Lavrikova KA. Assessment of the palatability of Atlantic salmon by NMR spectroscopy. Food Systems. 2023;6(3):350–357. (In Russ.). [Абрамова Л. С., Козин А. В., Гусева Е. С., Лаврикова К. А. Оценка вкусовых качеств лосося атлантического методом ЯМР-спектроскопии. Пищевые системы. 2023. Т. 6. № 3. С. 350–357.] <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2023-6-3-350-357>
104. Gribbestad IS, Aursand M, Martinez I. High-resolution ¹H magnetic resonance spectroscopy of whole fish, fillets and extracts of farmed Atlantic salmon (*Salmo salar*) for quality assessment and compositional analyses. Aquaculture. 2005;250(1):445–457. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2005.02.031>
105. Martinez I, Bathen T, Standal IB, Halvorsen J, Aursand M, et al. Bioactive compounds in cod (*Gadus morhua*) products and suitability of ¹H NMR metabolite profiling for classification of the products using multivariate data analyses. Journal of Agricultural and Food Chemistry. 2005;53(17):6889–6895. <https://doi.org/10.1021/jf0507902>
106. Kaltenbach KH, Kuballa T, Schröder U, Fritsche J, Bunzel M, et al. Evaluation of NMR-based strategies to differentiate fresh from frozen-thawed fish supported by multivariate data analysis. European Food Research and Technology. 2024;250:239–251. <https://doi.org/10.1007/s00217-023-04383-x>
107. Roques S, Deborde C, Richard N, Sargent L, Kurz F, et al. Characterizing alternative feeds for rainbow trout (*O. mykiss*) by ¹H NMR metabolomics. Metabolomics. 2018;14(12):155. <https://doi.org/10.1007/s11306-018-1454-5>
108. Gunnarsson P, Eriksson RH, Mihnea M, Vidakovic A, Langeland M, et al. Broadly sourced alternative proteins alter muscle metabolome while maintaining sensory quality in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). Journal of Agricultural and Food Chemistry. 2025;73(44):28511–28523. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.5c07909>
109. Abramova LS. Determination of the quality index of chilled and thawed fish raw materials by NMR relaxometry: Proceedings Sci. works of scientists and specialists Innovative Technologies for Processing and Storing Agricultural Raw Materials and Food Products. М., 2020;15–24. (In Russ.). [Абрамова Л. С. Определение показателя качества охлажденного и размороженного рыбного сырья методом ЯМР-релаксометрии: материалы научных трудов ученых и специалистов «Инновационные технологии обработки и хранения сельскохозяйственного сырья и пищевых продуктов». М., 2020. С. 15–24.] <https://elibrary.ru/CZTKFK>
110. Zhao M, You X, Wu Y, Wang L, Wu W, et al. Acute heat stress during transportation deteriorated the qualities of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) fillets during chilling storage and its relief attempt by ascorbic acid. LWT. 2022;156:112844. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112844>

Additional information about the authors / Дополнительная информация об авторах

Mikhail N. Kutuzov / Кутузов Михаил Николаевич ORCID 0000-0002-1330-9782; eLIBRARY SPIN 6578-1392
 Maria A. Belova / Белова Мария Алексеевна ORCID 0009-0008-6466-3854; eLIBRARY SPIN 4562-1661
 Olga V. Novichenko / Новиченко Ольга Викторовна ORCID 0000-0002-4282-9728; eLIBRARY SPIN 7656-9566
 Igor A. Nikitin / Никитин Игорь Алексеевич ORCID 0000-0002-8988-5911; eLIBRARY SPIN 9342-6517
 Hicham Zaroual / Заруал Хишам ORCID 0000-0002-1571-5354
 Vladislav S. Vishnyakov / Вишняков Владислав Сергеевич ORCID 0009-0003-8635-5143
 Daria D. Vilkova / Вилкова Дарья Дмитриевна ORCID 0000-0002-2869-8709; eLIBRARY SPIN 1912-6020

<https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-2-2636>
<https://elibrary.ru/WONCBU>

Оригинальная статья
<https://fptt.ru>

Изоляты белка из обезжиренной гороховой муки: получение и оценка качества



А. Ю. Глухарев^{1,*}, Ю. А. Кучина¹, С. Р. Деркач¹,
А. С. Князева², Д. А. Утьянов²

¹ Мурманский арктический университет , Мурманск, Россия

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

Поступила в редакцию: 15.10.2025

Принята после рецензирования: 25.11.2025

Принята к публикации: 10.03.2026

*e-mail: glukharevayu@yandex.ru

© А. Ю. Глухарев, Ю. А. Кучина, С. Р. Деркач,

А. С. Князева, Д. А. Утьянов, 2026



Аннотация.

Совершенствование технологии производства белкового изолята из гороха вызывает большой интерес у исследователей и производителей пищевой продукции. Отсутствие стадии обезжиривания сырья в производстве изолята горохового белка приводит к снижению качества продукта, а также более низкому содержанию белка (80–85 %) по сравнению с животными или растительными аналогами (≥ 90 %). Таким образом, вопрос повышения эффективности использования сырья в технологии извлечения белка из гороха является особо актуальным. Цель исследования – изучить возможность использования стадии обезжиривания сырья в технологии получения изолята горохового белка и выбрать наиболее эффективный растворитель на основе оценки влияния данной операции на качество получаемого высокобелкового продукта.

Образцы белкового изолята из гороховой муки получали методом щелочной экстракции с изoeлектрическим осаждением. Для обезжиривания гороховой муки использовали н-гексан, ацетон и этанол. Химический состав, белизну, растворимость, аминокислотный состав и ИК-спектры белков исследуемых образцов изучали с помощью стандартных физико-химических методов анализа.

Установлено влияние используемого растворителя на стадии обезжиривания сырья на свойства образцов гороховой муки и белкового изолята. Удаление жира позволило увеличить белизну гороховой муки и улучшить цвет готового продукта. Содержание белка в образцах белкового изолята из обезжиренной гороховой муки составило 84,7 % – при использовании н-гексана, 88,0 % – ацетона, 89,6 % – этанола. Аминокислотный анализ показал высокое содержание незаменимых аминокислот. Изучена растворимость белка в воде. Исследование ИК-спектров не выявило изменения структуры белков. Комплексный показатель качества обезжиривания позволил определить, что наиболее подходящим растворителем является ацетон, который способствует получению продукта с улучшенными характеристиками и высоким выходом белка.

Экспериментально доказана принципиальная возможность повышения содержания белка в белковом изоляте и улучшения цвета продукта за счет экстракции жира из гороховой муки. Полученные результаты могут быть использованы для улучшения технологии белкового изолята из гороха, а также других белковых продуктов из сырья животного или растительного происхождения.

Ключевые слова. Растительное сырье, горох, гороховая мука, белковый продукт, изолят белка, обезжиривание, совершенствование технологии, аминокислотный состав, качество продукта

Для цитирования: Глухарев А. Ю., Кучина Ю. А., Деркач С. Р., Князева А. С., Утьянов Д. А. Изоляты белка из обезжиренной гороховой муки: получение и оценка качества. Техника и технология пищевых производств. 2026. Т. 56. № 2. С. 277–295. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-2-2636>

Protein Isolates from Defatted Pea Flour: Production and Quality Assessment



Andrei Yu. Glukharev^{1,*}, Yuliya A. Kuchina¹,
Svetlana R. Derkach¹, Alexandra S. Knyazeva²,
Dmitry A. Utyanov²

¹ Murmansk Arctic University^{ROR}, Murmansk, Russia

² V. M. Gorbatov Federal Research Center for Food Systems of RAS^{ROR}, Moscow, Russia

Received: 15.10.2025

Revised: 25.11.2025

Accepted: 10.03.2026

*e-mail: glukharevayu@yandex.ru

© A. Yu. Glukharev, Yu. A. Kuchina, S. R. Derkach, A. S. Knyazeva,
D. A. Utyanov, 2026



Abstract.

Advances in pea protein isolate technology are driving interest across research and industrial food sectors. Without defatting stage, pea protein isolate tends to demonstrate lower quality and protein content (80–85%), compared to animal or vegetable analogues (≥ 90%). This article introduces an improved pea protein isolate technology with increased protein mass fraction.

Protein isolate samples were obtained from pea flour by alkaline extraction with isoelectric deposition. N-hexane, acetone, and ethanol served as defatters. The chemical composition, whiteness, solubility, amino acid composition, and IR spectra of proteins were studied using standard physicochemical methods.

The solvent used at the defatting stage proved to affect the properties of protein isolate and protein flour. The defatted flour was whiter, and the color of the finished product was better. The protein content in the defatted protein isolate was 84.7% when using n-hexane, 88.0% for acetone, and 89.6% for ethanol. The protein was rich in essential amino acids; the water solubility improved. The IR spectra revealed no structural changes. Acetone proved to be the most suitable solvent, yielding a protein-rich product with improved characteristics.

Defatting significantly increased protein yield and improved the color profile of protein isolate. These insights are applicable for optimizing the processing of both plant and animal-derived proteins.

Keywords. Vegetable raw material, peas, pea flour, protein product, protein isolate, defatting, technology improvement, amino acid composition, product quality

For citation: Glukharev AY, Kuchina YuA, Derkach SR, Knyazeva AS, Utyanov DA. Protein Isolates from Defatted Pea Flour: Production and Quality Assessment. 2026;56(2):277–295. (In Russ.) <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-2-2636>

Введение

Современные тенденции в области производства продуктов питания направлены на глубокую переработку сырья с целью максимального извлечения из него ценных пищевых и биологически активных веществ – получения продуктов с высокой добавленной стоимостью, в т. ч. белков [1, 2]. Белки – основные вещества, необходимые для поддержания здоровья и оптимальной работоспособности. Они выполняют важную роль в питании и участвуют в широком спектре метаболических процессов [3]. Удовлетворение физиологической потребности в белке является ключевым фактором в обеспечении полноценного питания человека [4, 5].

Согласно прогнозам, к 2050 г. численность населения мира достигнет 9,8 млрд человек, а спрос на безопасные и питательные продукты питания возрастет на 70 %. В связи с этим в настоящее время все больше

научных исследований посвящено поиску и изучению альтернативных и устойчивых источников пищевого белка [6]. Оценка перспектив использования таких источников способствует снижению негативного воздействия мирового производства мяса на окружающую среду [7–9]. Среди альтернативных источников особое место занимают продукты на растительной основе. Растительное сырье обладает особыми преимуществами для получения белка: оно значительно дешевле животного, более доступно и требует меньших затрат для производства, хранения и транспортировки [10–12].

За последние несколько лет рынок растительных продуктов стремительно растет, и, согласно прогнозам, к 2030 г. его мировой объем достигнет 161 млрд долларов¹ [12]. Возросший интерес к растительным продуктам

¹ Plant-based food market value worldwide 2030. Statista. 2024. URL: <https://www.statista.com/statistics/1280394/global-plant-based-food-market-value> (дата обращения: 09.09.2025).

богатым белком обусловлен общемировым трендом, направленным на смещение диетических привычек в сторону растительного рациона в связи с этическим выбором (веганство, вегетарианство и флекситарианство) или ограничениями в питании из-за проблем со здоровьем (пищевые аллергии). В этой связи производство белковых препаратов из растительного сырья и продуктов на их основе имеет важное экономическое значение и представляет собой актуальную задачу как для исследователей, так и для производителей пищевой продукции.

Белковые препараты, в частности изоляты белка, относятся к одним из наиболее востребованных продуктов на мировом и отечественном рынках пищевых ингредиентов. Изоляты – высокоочищенная форма белкового продукта, содержащая не менее 85–90 % белка и хорошо усваиваемая организмом. Изоляты имеют вид сухого тонкоизмельченного порошкообразного продукта однородной консистенции с цветом и запахом, свойственным используемому сырью, либо обладают нейтральными органолептическими характеристиками [5, 13].

На сегодняшний день мировое промышленное производство белковых препаратов практически полностью базируется на переработке сои [14, 15]. Вместе с тем пристальное внимание уделяется получению белков из других растительных источников, которые отличаются полноценным составом, хорошо перевариваются и усваиваются организмом человека, а также не вызывают аллергических реакций. [12]. Одним из таких перспективных сырьевых источников для создания пищевого белка является горох (*Pisum sativum* L.).

Горох – важная сельскохозяйственная культура, используемая для получения пищевого и кормового сырья. В его состав входят ценные соединения биологической природы, различающиеся по химическому строению и биологической активности. Среди источников растительного белка горох привлекает повышенное внимание на агропродовольственном рынке, поскольку потребители воспринимают продукты на растительной основе как этичные (без тестирования на животных), полезные и экологически чистые [16, 17]. Горох является второй по значимости бобовой культурой, охватывающей более трети (34,2 %) от общей площади посева бобовых [12]. Также горох считается основной зернобобовой культурой в России. По данным Росстата, валовой сбор гороха в России составляет около 2–3 млн т/г². Данная культура не относится к генетически модифицированным растениям и ценится за высокое содержание белка, сложных углеводов, фолиевой кислоты, витаминов, а также минеральных веществ – калия и железа. Среднее содержание белка в высушенном горохе в зависимости от сорта составляет 23–31 %,

липидов – 1,0–2,0 %, углеводов (включая крахмал, пищевые волокна и сахара) – 60–65 %, золы – около 3 % [12, 18].

Гороховый протеин занимает особое положение на рынке белковых препаратов, т. к. не входит в списки приоритетных аллергенных продуктов, считается полезным видом белка для большинства людей [19] и имеет общепризнанный безопасный статус (GRAS) для использования в широком спектре пищевых продуктов³. Согласно ряду исследований, усвояемость горохового белка близка к усвояемости животных белков [20, 21] и выше, чем у многих других растительных продуктов [22–24]. При этом аллергия на горох не относится к широко распространенной, а ее точные масштабы не установлены [25]. Большинство зарегистрированных случаев аллергии встречаются редко и могут возникать в результате перекрестной реакции [26].

В настоящее время производство высокобелковых продуктов из гороха в России развивается слабо. Глубокой переработкой гороха на территории страны занимаются лишь несколько предприятий, включая ООО «Евро технологии» и АО «ОХК Уралхим»⁴ [27]. В то же время существует значительный потенциал для создания таких белковых препаратов и ингредиентов. В основном горох реализуют в торговых сетях в замороженном, высушенном (крупа), измельченном (гороховая мука) и консервированном виде. Внедрение технологии производства горохового белка в пищевую промышленность – действенный способ по замене зарубежных аналогов отечественной продукцией, не уступающей ей в качестве и обладающей более низкой стоимостью.

Актуальность проблемы замещения белков животного происхождения весьма велика, как и значимость развития технологии получения горохового белка, в т. ч. как основы для включения в широкий спектр пищевой продукции [28]. Гороховый протеин способен стать хорошей альтернативой животным белкам, его можно использовать для производства продуктов детского, спортивного и диетического питания, хлебопекарной продукции, а также продуктов на растительной основе, например аналогов мясных, молочных или рыбных продуктов. Кроме того, он применим в животноводстве и аквакультуре [16, 29, 30].

Белки из гороха получают с использованием различных химических и физических методов: щелочная экстракция с изoeлектрическим осаждением [31], ультрафильтрация с диафильтрацией [32, 33], воздушная классификация и трибоэлектрическое разделение, соле-

³ Martin RL, Thomas JA, Soni MG. Evaluation of the Generally Recognized as Safe (GRAS) Status of Pea Protein. U. S. Food and Drug Administration (FDA). 2018. URL: <https://www.fda.gov/files/food/published/GRAS-Notice-GRN-788-Pea-protein-concentrate.pdf> (дата обращения 09.09.2025).

⁴ Первый российский завод по глубокой переработке гороха. Комбикорма. 2019. № 2. С. 32–33. URL: https://kombi-korma.ru/sites/default/files/2/02_19/02_2019_32-33.pdf (дата обращения 09.09.2025).

² Рыбакова Д. Э. Горох. Посевные площади, валовые сборы и урожайность в 2023 году. Экспертно-аналитический центр агробизнеса. 2024. URL: <https://ab-centre.ru/news/goroh-posevnye-ploschadi-valovye-sbory-i-urozhaynost-v-2023-godu> (дата обращения: 09.09.2025).

вая экстракция и мицеллизация, мягкое фракционирование с использованием гибридного подхода и др. [20]. Несмотря на значительное количество исследований, направленных на получение высококонцентрированных белковых продуктов из гороха, до сих пор остается недостаточно изученной проблема отсутствия в технологии обезжиривания сырья – одной из основных технологических операций, используемых в различных областях, включая пищевую промышленность и производство нутрицевтиков, для повышения качества и функциональности продукции. Обезжиривание предполагает применение растворителя для экстракции и удаления липидов (жиров) из богатых белком пищевых источников, что позволяет получить белковый изолят с более высокой чистотой и пониженным содержанием жира.

При промышленном получении горохового белка сырье не проходит стадию обезжиривания в связи с небольшим количеством липидов, в отличие, например от семян сои, содержащих 15–25 % липидов [34, 35]. Тем не менее отсутствие данной операции затрудняет процесс выделения целевого продукта [36], способствует окислению жирорастворимых соединений, которые вносят значительный вклад в образование специфического (бобового) запаха [37], и сокращает срок годности готового продукта [38]. В связи с этим совершенствование технологии получения горохового белка за счет введения дополнительной операции по подготовке сырья, а именно обезжиривания, может стать эффективным решением для увеличения содержания белка в продукте, улучшения его цвета и запаха и продления срока годности. При этом необходимо учитывать влияние обработки на качество готового продукта.

Обезжиривание может проводиться механическим способом – прессованием сырья, а также путем экстракции с использованием органических растворителей, что является наиболее эффективным методом, несмотря на некоторые экологические, экономические и безопасные недостатки. В работе A. Gravel *et al.* [39] установлено, что обезжиривание гороховой муки с использованием гексана не оказало значительного влияния на белковый профиль, но улучшило пенообразующие свойства изолята. L. L'hocine *et al.* [40] продемонстрировали, что обезжиривание соевого шрота с использованием органических растворителей имело денатурирующий эффект на соевый белок по сравнению с водной экстракцией. S. Dirr *et al.* [41] оценили влияние н-гексана на физико-химические свойства растительных белков из семян чиа. Обезжиривание позволило добиться высокого выхода белка, улучшило стабильность пены, влаго- и жиростойкость, однако растворимость при нейтральном pH снизилась [41].

Производители совершенствуют технологии получения белковых препаратов за счет внедрения прогрессивных методов обработки сырья для того, чтобы

создать безопасный продукт с высоким качеством и функциональными свойствами. Таким образом, цель исследования – изучить возможность использования стадии обезжиривания сырья в технологии получения изолята горохового белка и выбрать наиболее эффективный растворитель на основе оценки влияния данной операции на качество получаемого высокобелкового продукта.

Объекты и методы исследования

Исследования выполнены с использованием коммерческой муки из гороха (ООО «Гарнец», Владимир, Россия), которая отвечает требованиям ТУ 9293-009-89751414-10 «Мука гороховая, нутовая, чечевичная. Технические условия». В качестве объектов исследования на разных этапах работы выступали образцы гороховой муки и белковые изоляты из гороховой муки. Для экстрагентов жиров были выбраны н-гексан, ацетон и этанол как наиболее используемые растворители в пищевой промышленности для производства обезжиренной муки и белковых продуктов в связи с их высокой эффективностью и легкой доступностью⁵ [42].

Внешний вид и микроструктура используемой гороховой муки представлены на рисунке 1. Фотография получена с использованием камеры смартфона (Apple, США) (рис. 1a). Микрофотография сделана с помощью оптического микроскопа Olympus CX43 (Olympus Corporation, Япония) с фотонасадкой при увеличении $\times 4$ (рис. 1b). Мука из желтого гороха (*Pisum sativum* L.) представляла собой тонкоизмельченный порошкообразный продукт однородной консистенции с наличием небольших комочков, от кремово-желтого до светло-желтого цвета с легким запахом и вкусом свежего гороха, без посторонних ароматов и привкусов.

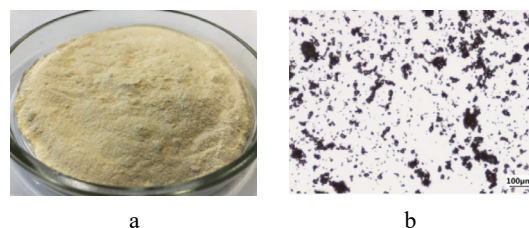


Рисунок 1. Внешний вид и микроструктура гороховой муки: а – фотография; б – микрофотография

Figure 1. Appearance and microstructure of pea flour: a – photograph; b – micrography

⁵ Решение Совета Евразийской экономической комиссии от 20.07.2012 N 58 (ред. от 29.08.2023) «О принятии технического регламента Таможенного союза "Требования безопасности пищевых добавок, ароматизаторов и технологических вспомогательных средств"» (вместе с «ТР ТС 029/2012. Технический регламент Таможенного союза. Требования безопасности пищевых добавок, ароматизаторов и технологических вспомогательных средств»). URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_133445/ (дата обращения 09.09.2025).

Гороховая мука до переработки хранилась в сухом, проветриваемом помещении в течение 2–3 месяцев при комнатной температуре 23–25 °С.

Для производства образцов белкового изолята использовали водные растворы гидроксида натрия (NaOH) с концентрацией 2 М и соляной кислоты (HCl) с концентрацией 1 М, приготовленные из химически чистых реактивов, отвечающих требованиям ГОСТ 4328-77 «Натрия гидроокись. Технические условия» и ГОСТ 3118-77 «Реактивы. Кислота соляная. Технические условия».

Для изучения влияния обезжиривания на качественные показатели сырья и белкового изолята была проведена экстракция липидов из гороховой муки с использованием органических растворителей: н-гексан, ацетон и этанол. Технические характеристики выбранных растворителей представлены в таблице 1.

Для получения белкового изолята из гороховой муки использовали метод щелочной экстракции с электрохимическим осаждением [43]. На рисунке 2 изображена усовершенствованная технологическая схема, иллюстрирующая этапы получения белкового изолята по данному методу. За основу была принята базовая технология производства изолята из аналогичного растительного сырья [44–46], в соответствии с которой получали контрольный образец. Для повышения массовой доли белка в готовом продукте и улучшения качественных показателей дополнительно вводили в технологию новую стадию – обезжиривание гороховой муки с помощью растворителей: н-гексана, ацетона и этанола. Данная технологическая операция выделена сиреневым цветом на схеме. Процесс обезжиривания проводился в аппарате Сокслета путем многократной экстракции муки органическими растворителями в течение 8 ч до исчезновения окрашивания регенерированного растворителя. Обезжиренную гороховую муку высушивали путем естественной сушки при температуре 23–25 °С в течение 12 ч до полного исчезновения запаха растворителя. В качестве образцов сравнения (контроль) использовали необработанную (необезжиренную) гороховую муку и белковый изолят, полученный из нее.

Отбор и подготовку проб для исследований осуществляли согласно ГОСТ 27668-88 «Мука и отруби.

Приемка и методы отбора проб» и ГОСТ 15113.0-77 «Концентраты пищевые. Правила приемки, отбор и подготовка проб».

Химический состав объектов исследования, который включал массовые доли воды, жира, белка и золы на сырую массу анализировали по методикам, признанными стандартными. Массовую долю влаги определяли с использованием метода высушивания образца в сушильном шкафу до постоянной массы согласно ГОСТ 9404-88 «Мука и отруби. Метод определения влажности» и ГОСТ 15113.4-2021 «Концентраты пищевые. Гравиметрические методы определения массовой доли влаги». Массовую долю жира устанавливали методом экстракции образца диэтиловым эфиром (х. ч.) в аппарате Сокслета по ГОСТ 29033-91 «Зерно и продукты его переработки. Метод определения жира» и ГОСТ 15113.9-77 «Концентраты пищевые. Методы определения жира». Массовую долю общего азота выявляли методом Кьельдаля по ГОСТ 10846-91 «Зерно и продукты его переработки. Метод определения белка». Для расчета массовой доли белка использовали коэффициент пересчета общего азота на белок для семян бобовых культур и продуктов их переработки – 6,25. Массовую долю золы находили гравиметрическим методом после сжигания навески образца в муфельной печи LOIP LF-7/11-G1 до получения светло-серого остатка по ГОСТ Р 51411-99 «Зерно и продукты его переработки. Определение зольности (общей золы)» и ГОСТ 15113.8-77 «Концентраты пищевые. Методы определения золы».

Массовую долю углеводов, %, вычисляли расчетным методом по формуле (1):

$$U = 100 - (B + \beta + \mathcal{J} + 3) \quad (1)$$

где B , β , $\mathcal{J}$, 3 – массовые доли воды, белка, жира и золы в продукте соответственно, %.

Эффективность обезжиривания (ЭО, %) рассчитывали по формуле (2):

$$\text{ЭО} = \frac{M_1 \times \mathcal{J}_1 - M_2 \times \mathcal{J}_2}{M_1 \times \mathcal{J}_1} \times 100 \quad (2)$$

где M_1 , M_2 – масса гороховой муки до и после обезжиривания соответственно, $\mathcal{J}_1$ и $\mathcal{J}_2$ – массовая доля жира в гороховой муке до и после обезжиривания, %.

Таблица 1. Технические характеристики органических растворителей, используемых для обезжиривания гороховой муки

Table 1. Technical characteristics of organic solvents used as defatters

Растворитель	Степень чистоты	Массовая доля основного химического вещества, %	ГОСТ / ТУ
н-гексан	Химический чистый	99,0	ТУ 2631-158-44493179-13 «Гексан. Технические условия» (ЗАО «ЭКОС-1», Россия)
Ацетон	Чистый для анализа	99,8	ГОСТ 2603-79 «Реактивы. Ацетон. Технические условия»
Этиловый спирт (этанол)	Технический	95,0	ГОСТ 17299-78 «Спирт этиловый технический. Технические условия»

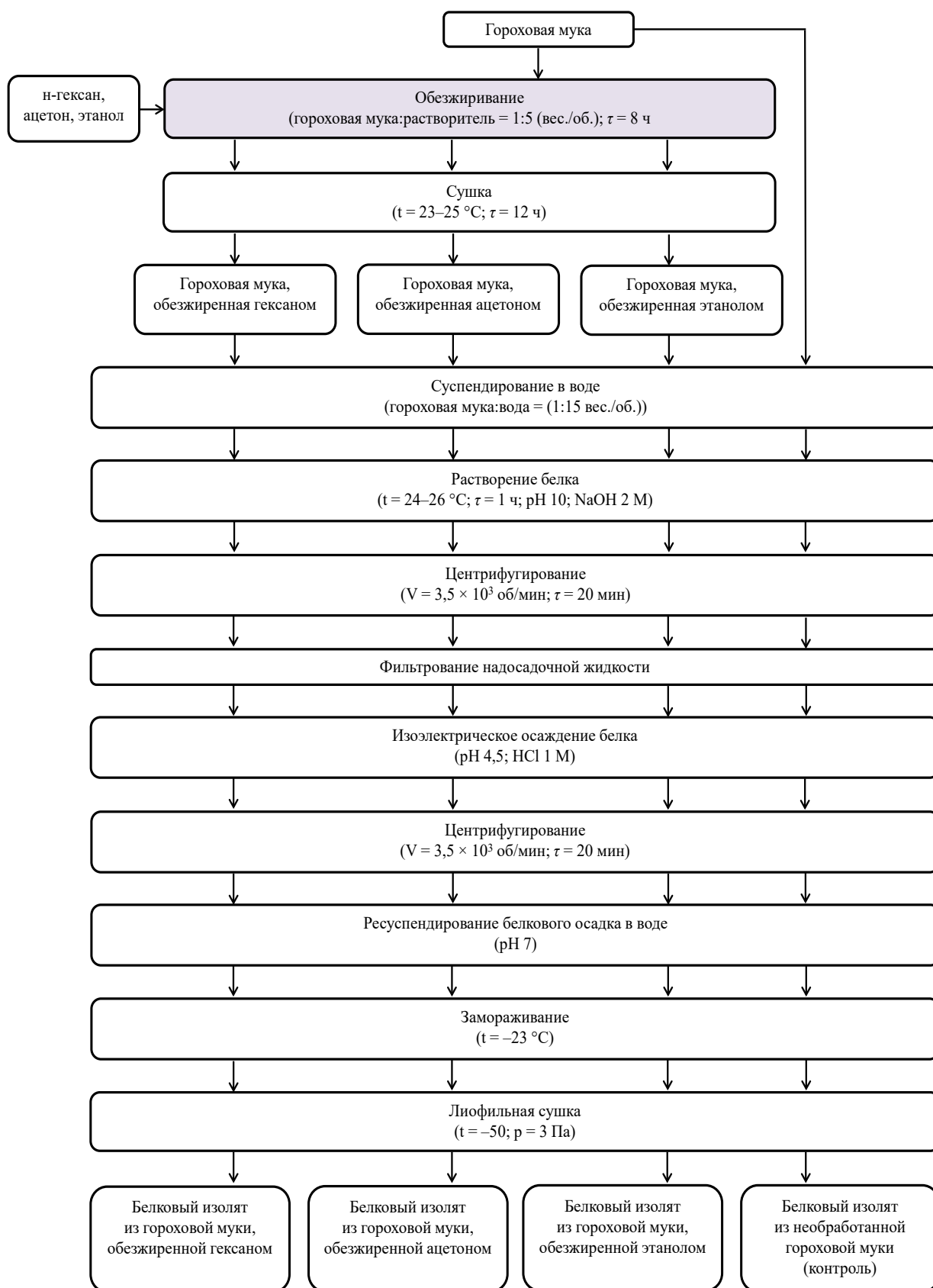


Рисунок 2. Получение образцов белкового изолята с использованием метода щелочной экстракции с осаждением в изоэлектрической точке

Figure 2. Obtaining protein isolate samples by alkaline extraction with isoelectric precipitation

Выход продукта (ВП, %) рассчитывали по формуле (3):

$$ВП = \frac{m}{M} \times 100 \quad (3)$$

где m – масса белкового изолята, г; M – масса гороховой муки, г.

Выход белка (ВБ, %) выявляли по формуле (4):

$$ВБ = \frac{m \times B_1}{M \times B_2} \times 100 \quad (4)$$

где m – масса белкового изолята, г; B_1 – массовая доля белка в белковом изоляте, %; M – масса гороховой муки, г; B_2 – массовая доля белка в гороховой муке, %.

Растворимость образцов белкового изолята в воде находили гравиметрическим методом по ГОСТ 7636-85 «Рыба, морские млекопитающие, морские беспозвоночные и продукты их переработки. Методы анализа», основанным на весовом определении нерастворимой части белка в воде.

Фотофиксацию образцов гороховой муки и белкового изолята осуществляли с использованием камеры смартфона (Apple, США). Образцы в чашках Петри помещали на лист фильтровальной бумаги, фотосъемку производили под прямым углом к плоскости фотографируемого объекта с использованием искусственного освещения (холодный белый свет). Расстояние от камеры до объекта 10–15 см.

Белизну образцов гороховой муки определяли с помощью прибора КЕТТ С-100 (KETT Electric Laboratory, Япония) в соответствии с методикой, приведенной в руководстве по эксплуатации прибора.

Количественный аминокислотный анализ белков образцов гороховой муки и белкового изолята проводили методом ВЭЖХ-УФ. В данном методе применяли хроматографическое разделение аминокислот, подвергнутых дериватизации с использованием ортофталевого альдегида (ОРА) в присутствии ФМОС-реагента, и определение его количества детектированием в ультрафиолетовом спектре. Использовали жидкостный хроматограф Agilent 1260 Infinity II с диодно-матричным детектором (Agilent Technologies, США), колонка Agilent Eclipse Plus C18 (3,5 мкм, 4,6×150 мм). Градиентное разделение осуществляли с использованием подвижных фаз А (ацетонитрил:метанол:вода 45:45:10) и Б (10 мМ Na₂HPO₄, 10 мМ Na₂B₄O₇, pH 8,2); скорость потока элюента 1 мл/мин, температура колонки 30 °С. Длины волн для детектирования – 338 и 262 нм. Для калибровки прибора задействовали стандартную смесь аминокислот Supelco (Merck KGaA, Германия). Перед анализом исследуемые образцы высушивали при 100 °С и обезжиривали хлороформом. Гидролиз образцов осуществляли в кислой среде (6 М HCl) в течение 24 ч при температуре 120 °С. После гидролиза пробирки охлаждали, содержимое упаривали в ротаторном испарителе. Сухой остаток растворяли в 1 мл буферного раствора (pH 2,2). Раствор пропускали через шприцевой фильтр

с диаметром пор 0,45 мкм в хроматографическую вials объемом 2 мл и применяли для анализа.

Для идентификации полученных образцов белкового изолята задействовали метод ИК-спектроскопии. Спектры поглощения записывали на инфракрасном спектрофотометре с Фурье-преобразованием IRT-racer-100 (Shimadzu, Япония) в диапазоне частот от 4000 до 600 см⁻¹, при разрешении 4 см⁻¹ (число сканирований – 250). Предварительно исследуемые образцы измельчали на планетарной микромельнице Pulverisette 7 (FRITSCH GMBH, Германия) в течение 30 мин при 500 об/мин, смешивали с КВг в соотношении 1:75 по массе и выдерживали в сушильном шкафу при температуре 60 ± 1 °С в течение 6–8 ч для удаления остатков влаги. Затем смесь прессовали под давлением 650 кгс/см² 1 мин при комнатной температуре. ИК-спектры снимали сразу после прессования. Для того чтобы свести к минимуму влияние следов влаги (паров воды), из полученных спектров вычитали спектр водяного пара.

ИК-спектр в области поглощения полосы Амид I (1600–1700 см⁻¹) был обработан с использованием графической программы OriginPro 9.0. Анализ вторичной структуры белковых макромолекул проводили методом второй производной. Для получения количественной информации полосу Амид I раскладывали на несколько компонент с помощью распределения Гаусса. Количественный вклад каждой конформации (компоненты) вторичной структуры вычисляли как соотношение интегральной интенсивности соответствующей полосы к общей интегральной интенсивности полосы Амид I до разложения.

Комплексный показатель качества обезжиривания (КПК, %) рассчитывали по формуле (5):

$$\begin{aligned} \text{КПК} = & 0,2 \times \text{ЭО} + 0,1 \times \frac{БМ \times 100}{87,3} + 0,2 \times \frac{СБ \times 100}{(100 - СБ)} + \\ & + 0,2 \times \text{ВП} + 0,2 \times \text{ВБ} + 0,1 \times P \end{aligned} \quad (5)$$

где ЭО – эффективность обезжиривания гороховой муки, %; БМ – белизна образцов гороховой муки, усл. ед. прибора; 87,3 – эталонное значение показателя белизны, усл. ед. прибора; СБ, СВ – массовая доля белка и воды в белковом изоляте, %; ВП – выход продукта, %; ВБ – выход белка, %; P – растворимость продукта в воде, %; 0,1 и 0,2 – коэффициенты значимости параметров обезжиривания, определенные экспертным методом.

Экспериментальные работы в рамках исследования выполнены на базе научно-исследовательской лаборатории «Химия и технология морских биоресурсов» Мурманского арктического университета (Мурманск, Россия). Аминокислотный состав белков гороховой муки и образцов белкового изолята определяли в лаборатории научно-методических работ, биологических и аналитических исследований Научно-

исследовательского испытательного центра ФГБНУ «ФНЦ пищевых систем им. В. М. Горбатова» РАН (Москва, Россия). ИК-спектры образцов белкового изолята получены в лаборатории химико-аналитических исследований Полярного филиала ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии» (Мурманск, Россия).

Все эксперименты выполняли в трехкратной повторности. Полученные результаты выражали в виде среднего арифметического значения $\pm$ стандартное отклонение. Доверительная вероятность (P) была установлена на уровне не менее 0,95. Для статистической обработки экспериментальных данных использовали однофакторный дисперсионный анализ (ANOVA). Различия между средними значениями считались статистически значимыми при α -уровне не более 0,05 ($\alpha = 1 - P$). Статистический анализ проводили с использованием программы Microsoft Office Excel 2021.

Результаты и их обсуждение

Обезжиривание сырья играет важную роль в получении высокобелковых ингредиентов, таких как изоляты, и может повлиять на физико-химические и функционально-технологические показатели, а также внешний вид получаемого продукта. Чтобы комплексно оценить влияние используемых растворителей на качественные характеристики белкового изолята, исследования проводили в два этапа.

Первый этап характеризовался изучением влияния обезжиривания гороховой муки на ее химический состав, внешний вид и белизну. Второй этап включал изучение химического состава образцов белкового изолята, определение выхода продукта и белка, оценку внешнего вида и цвета, анализ аминокислотного состава белков и ИК-спектров.

При изготовлении белкового изолята требуется знание общего молекулярного химического состава сырья, т. к. содержание отдельных групп веществ оказывает влияние не только на пищевую ценность

готового продукта, но и обуславливает выбор технологических режимов его изготовления.

В таблице 2 представлен химический состав исследуемых образцов гороховой муки и эффективность их обезжиривания в зависимости от используемых растворителей. Анализ данных показывает, что исходное сырье можно охарактеризовать главным образом как высокоуглеводное (65,9 %), со значительным содержанием белка (22,2 %) и низким уровнем жира (1,3 %). Такой химический состав подтверждает целесообразность использования гороховой муки для получения высокоценных белковых продуктов, а также крахмала, сахаров и клетчатки. Предварительная обработка сырья продемонстрировала высокую эффективность: обезжиривание позволяет удалить липидорастворимые соединения из муки и на 1,7–2,2 % увеличить содержание белка в ней. Методы на основе обезжиривания широко используются в пищевой промышленности для извлечения растительных масел из семян и муки. В работах других авторов органические растворители, такие как гексан [41], этанол и изопропанол [47], также показали высокую степень интенсивности при экстракции фракций масел из растительного сырья, используемого для производства белковых продуктов.

Известно, что групповой состав липидов нативного зерна гороха включает в себя полярные липиды и фосфолипиды (39,7 %), триацилглицериды (46,2 %), свободные жирные кислоты (11,6 %), стерин и эфиры стерина (2,5 %) [48]. Наблюдаемые отличия в остаточном содержании жира в обработанной гороховой муке могут объясняться различной полярностью и температурой кипения используемых растворителей. Чем ниже температура кипения растворителя, тем больше циклов за единицу времени он может совершить в экстракционном аппарате. Наиболее эффективным растворителем в данном эксперименте оказался ацетон, который имеет низкую температуру кипения и сочетает свойства полярного и неполярного растворителя, что делает его более универсальным для растворения жиров.

Таблица 2. Химический состав и эффективность обезжиривания образцов гороховой муки

Table 2. Chemical composition and effectiveness of degreasing of pea flour defatting

Показатель	Растворитель			
	Контроль (без обработки)	н-гексан	Ацетон	Этанол
воды	8,32 $\pm$ 0,05	4,40 $\pm$ 0,04	4,61 $\pm$ 0,01	6,78 $\pm$ 0,01
белка	22,15 $\pm$ 1,32	23,84 $\pm$ 0,06	24,22 $\pm$ 0,21	24,35 $\pm$ 0,92
жира	1,32 $\pm$ 0,06	0,21 $\pm$ 0,01	0,03 $\pm$ 0,01	0,19 $\pm$ 0,02
зола	2,41 $\pm$ 0,02	2,47 $\pm$ 0,01	2,39 $\pm$ 0,03	2,19 $\pm$ 0,01
углеводов	65,80 $\pm$ 1,43	69,08 $\pm$ 0,07	68,75 $\pm$ 0,23	66,49 $\pm$ 0,92
Эффективность обезжиривания, %	–	85,42 $\pm$ 0,29	97,61 $\pm$ 0,06	86,09 $\pm$ 0,05

Примечание: данные представлены в виде среднего арифметического значения $\pm$ стандартное отклонение для группы $n = 3$ при доверительной вероятности $P \geq 0,95$. Средние значения в строках имеют значимые различия при уровне значимости $\alpha < 0,05$.

Note: The data are arithmetic means $\pm$ standard deviation ($n = 3$; $P \geq 0.95$). The mean values in the rows are significantly different at $\alpha < 0.05$.

Внешний вид пищевых продуктов, определяемый веществами, как входящими в состав сырья и ингредиентов, так и образующимися в процессе их производства и хранения, является одним из основных факторов, влияющих на визуальную оценку качества товара потребителями [49]. Цветовые качества гороха обусловлены тремя классами соединений: ксантофиллами – кислородсодержащими каротиноидами, хлорофиллами и их производными, а также углеводородными каротиноидами [50]. Изменение цвета позволяет проанализировать влияние на продукт различных факторов, в т. ч. обезжиривания.

На рисунке 3 представлен внешний вид гороховой муки до и после обезжиривания. Гороховая мука до обезжиривания обладает светло-желтым цветом, что обусловлено высоким содержанием каротиноидов, остающихся после созревания и переработки гороха, когда хлорофилл разрушается [51, 52]. По своей природе эти пигменты относятся к группе липидов и эффективно растворяются в органических растворителях. Обезжиривание приводит к удалению из сырья каротиноидных пигментов и, как следствие, к обесцвечиванию муки. Так, образец гороховой муки, обезжиренный н-гексаном, приобрел светло-бежевый цвет, а после обработки ацетоном и этанолом – белый. Визуальная оценка цвета муки позволила определить степень извлечения каротиноидов в зависимости от используемого растворителя. В работах [53, 54] показано, что в горохе присутствуют высокие количества лютеина (в среднем 14,6 мкг/г) – желтого пигмента, относящегося к группе гидроксилированных каротиноидов – ксантофиллов. Лютеин содержит гидроксильные группы и обладает полярностью, поэтому хорошо растворим в этаноле и ацетоне, что обеспечивает получение муки с белым цветом. Таким образом, обезжиривание гороховой муки улучшает ее цвет благодаря экстракции природных пигментов. Стоит также отметить, что за счет отделения жирорастворимых вкусовых и ароматических веществ снижается бобовый аромат муки, что может положительно повлиять на органолептические показатели готового продукта.

Инструментальные методы по сравнению с визуальной оценкой цвета позволяют достоверно и с высокой точностью проанализировать изменение оптических свойств муки после обезжиривания, а также количественно выразить полученный результат независимо от физического состояния дегустатора. С этой целью использовали прибор для определения показателя белизны. На рисунке 4 представлено изменение белизны образцов муки в зависимости от используемых растворителей. Показатель белизны муки при обезжиривании увеличивается на 2,5 усл. ед. прибора при использовании н-гексана, на 4,2 усл. ед. прибора – ацетона и на 5,1 усл. ед. прибора – этанола. Полученные результаты согласуются с визуальной оценкой, которая показала, что использование ацетона и этанола приводит к улучшению цвета гороховой муки, а именно

к ее обесцвечиванию (рис. 2). Аналогичные наблюдения были опубликованы в работах [41, 55], авторы которых отмечают, что цветовые характеристики белкового сырья и продуктов изменяются после обезжиривания в сторону увеличения показателя светлоты.

Одним из широко применяемых способов получения белкового изолята является метод щелочной экстракции с последующим изоэлектрическим осаждением белковых веществ. Данный способ позволяет добиться высокого выхода продукта и обеспечивает хорошую степень очистки белка от сопутствующих

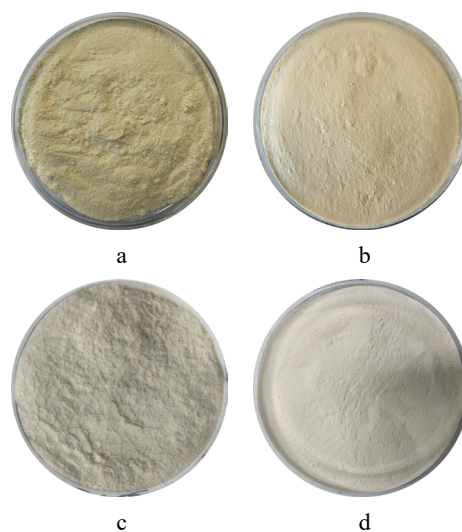


Рисунок 3. Внешний вид образцов гороховой муки: а – до обезжиривания; б – после обезжиривания н-гексаном; с – после обезжиривания ацетоном; d – после обезжиривания этанолом

Figure 3. Pea flour samples: a – before defatting; b – after defatting n-hexane; c – after defatting acetone; and d – after defatting ethanol

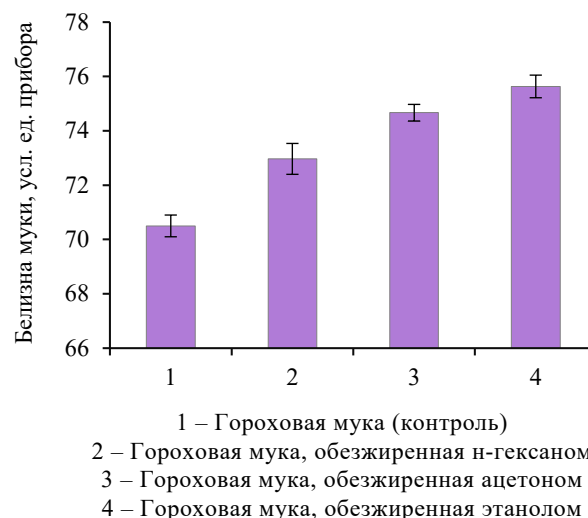


Рисунок 4. Показатель белизны образцов гороховой муки

Figure 4. Whiteness index of pea flour samples

веществ за счет его экстракции и концентрирования водными растворами различной ионной силы. В его основе лежит принцип, различной растворимости белковых веществ, которая максимальна в щелочной среде ($\text{pH} > 7$) и минимальна вблизи изоэлектрической точки [5, 12]. В лабораторных условиях были смоделированы процессы производства белкового изолята из полученных образцов гороховой муки указанным способом.

В настоящее время в России отсутствует отдельный государственный стандарт, устанавливающий технические требования к качеству растительных белковых изолятов, в т. ч. из гороха. Качество таких продуктов регулируется отдельными ТУ, которые разрабатываются производителями. Коммерческие образцы изолятов горохового белка обычно имеют массовую долю белка 80–85 %, что, согласно классификации Министерства сельского хозяйства США (USDA), а также ГОСТ 34006-2016, соответствует белковому концентрату (при содержании белка менее 90 %). Это создает определенные трудности при идентификации данного вида продукта, поэтому повышение содержания белка в нем является важной технологической задачей.

Степень очистки фракций растительных белков от сопутствующих веществ (жиров, углеводов и др.) выступает важным показателем при контроле качества получаемых изолятов, что подтверждается изучением химического состава продукта. Химический состав образцов белкового изолята, полученных из необезжиренной и обезжиренной муки, представлен в таблице 3. Удаление жира из муки с помощью растворителей и последующее ее использование в производстве белкового изолята привело к увеличению содержания белка в продукте: на 3,9 % при использовании *n*-гексана, на 8,0 % – ацетона и на 8,8 % – этанола. Содержание жира в образцах белкового изолята напрямую зависит от его количества в сырье, а также от условий получения изолятов. Так, в образцах белкового изолята, полученных из обезжиренной муки, концентрация остаточного жира была низкой (0,2 %) по сравнению

с контрольным образцом белкового изолята (5,8 %). Различное содержание углеводов между образцами свидетельствует о том, что удаление углеводных соединений в процессе получения продукта происходит эффективнее из обезжиренной муки, что положительно сказывается на чистоте белка. Следует также отметить, что технологические условия получения белкового изолята приводят к образованию солей, являющихся компонентом золы: после щелочного растворения белка (при $\text{pH} 10$) pH раствора доводили до значений, необходимых для осаждения белковых веществ ($\text{pH} 4,5$), при этом в процессе нейтрализации раствора происходит выделение хлорида натрия. Увеличение содержания золы в образцах из обезжиренной муки на 1–2 %, вероятно, связано с буферными свойствами белковых веществ и, как следствие, необходимостью добавления в суспензию большего количества раствора гидроксида натрия для растворения белка. Аналогичные результаты получены A. Gravel *et al.* [39]. Таким образом, использование стадии обезжиривания в технологии получения белкового изолята повышает степень извлечения белка из гороховой муки, что может быть полезно с точки зрения совершенствования технологии и улучшения качественных характеристик продукта.

Выход продукта и белка – ключевые показатели эффективности технологического процесса, играющие важную роль при обосновании использования новых производственных операций. Под выходом продукта понимается отношение массы полученного изолята горохового белка к массе использованной гороховой муки. Под выходом белка – количество извлеченного из гороховой муки целевого компонента (белка) в изоляте по отношению к общему количеству белка, присутствовавшему в исходном сырье. Выход белка обычно служит мерой оценки степени извлечения белка из сырья в процессе экстракции. Указанные показатели рассчитывали по формулам (3) и (4).

Изменение выхода продукта и белка в зависимости от используемого растворителя на стадии обезжиривания сырья представлено на рисунке 5. Установлено,

Таблица 3. Химический состав образцов белкового изолята из гороховой муки, обезжиренной различными растворителями

Table 3. Chemical composition of protein isolate samples from pea flour, skimmed with various solvents

Массовая доля, %	Растворитель			
	Контроль (без обработки)	<i>n</i> -гексан	Ацетон	Этанол
воды	4,00 ± 0,34	6,72 ± 0,06	5,15 ± 0,05	5,18 ± 0,03
белка	80,79 ± 1,08	84,65 ± 0,45	88,01 ± 0,14	89,59 ± 0,13
жира	5,75 ± 0,14	0,21 ± 0,01	0,19 ± 0,02	0,23 ± 0,05
золы	2,99 ± 0,14	4,02 ± 0,03	4,16 ± 0,01	4,89 ± 0,09
углеводов	6,47 ± 1,19	4,41 ± 0,45	2,49 ± 0,21	0,12 ± 0,03

Примечание: данные представлены в виде среднего арифметического значения ± стандартное отклонение для группы $n = 3$ при доверительной вероятности $P \geq 0,95$. Средние значения в строках имеют значимые различия при уровне значимости $\alpha < 0,05$.

Note: The data are arithmetic means ± standard deviation ($n = 3$; $P \geq 0.95$). The mean values in the rows are significantly different at $\alpha < 0.05$.

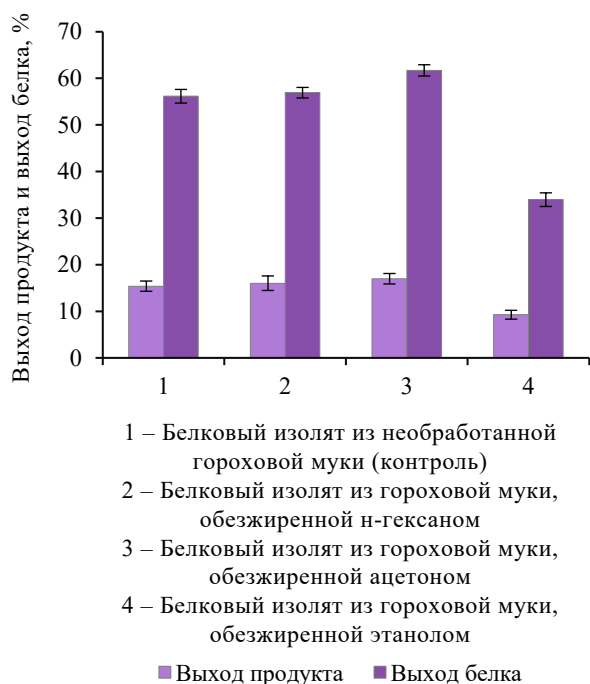


Рисунок 5. Выход продукта и белка в зависимости от растворителя, использованного для обезжиривания гороховой муки

Figure 5. Product yield and protein yield for different solvents

что обезжиривание гороховой муки влияет на эти показатели. Наблюдается увеличение выхода продукта: на 0,6 % при использовании муки, обезжиренной н-гексаном, и на 1,6 % – муки, обезжиренной ацетоном. Выход белка, в свою очередь, увеличился на 0,8 % при использовании муки, обезжиренной н-гексаном, и на 5,6 % – муки, обезжиренной ацетоном. При использовании этанола в качестве растворителя отмечается снижение выхода продукта на 6,1 % и выхода белка на 22,2 %. По-видимому, это связано с тем, что этанол имеет низкую диэлектрическую проницаемость, что может легко нарушить нековалентные взаимодействия в белке и вызвать его необратимую денатурацию, а также способствовать агрегации белковых частиц, которые теряются в процессе обработки [56]. При этом концентрация этанола играет решающую роль в данном процессе [57, 58]. Полученные результаты показывают, что использование этанола на стадии обезжиривания сырья не позволяет получить белковый изолят с высокими показателями выхода продукта и выхода белка. Для получения изолята горохового белка целесообразно использовать в качестве растворителей н-гексан или ацетон.

На рисунке 6 показан внешний вид образцов белкового изолята в зависимости от используемых растворителей на стадии обезжиривания сырья. Образцы представляли собой сухой порошкообразный продукт с однородной консистенцией, содержащий еди-

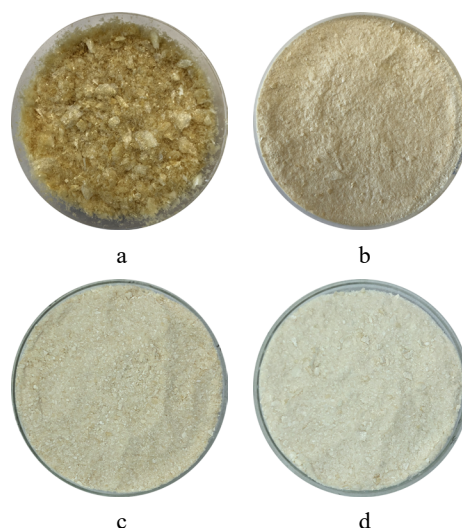


Рисунок 6. Внешний вид образцов белкового изолята в зависимости от используемого растворителя на стадии обезжиривания гороховой муки: а – контроль; б – н-гексан; с – ацетон; д – этанол

Figure 6. Appearance of protein isolate samples from different solvents: a – control; b – n-hexane; c – acetone; and d – ethanol

ничные или отдельные агломерированные частицы и комочки, рассыпающиеся при легком надавливании. Цвет продукта изменялся от желтого до светло-бежевого, что соответствовало цвету сырья, используемого при производстве (рис. 3). Продукт обладал запахом, свойственным гороховой муке с легким бобовым ароматом. Интенсивность горохового запаха была снижена у образцов белкового изолята, полученных из обезжиренной муки. В работе [58] промывка концентрата горохового белка водно-спиртовыми растворами позволила удалить из него летучие соединения, способствующие появлению неприятного привкуса.

Аминокислотный состав сырья и образцов белкового изолята, полученных из гороховой муки, обезжиренной с использованием различных растворителей, представлен в таблице 4. Аминокислотный профиль гороховой муки включает широкий спектр незаменимых и заменимых аминокислот. В белках гороха преобладает содержание таких незаменимых аминокислот, как изолейцин, лейцин, лизин, метионин, треонин и фенилаланин. Аминокислотный профиль горохового белка аналогичен аминокислотному составу других видов бобовых, за исключением некоторых незначительных изменений в нескольких аминокислотах.

Суммарно доля всех аминокислот в образцах белкового изолята увеличилась по сравнению с исходным сырьем, что обусловлено их концентрированием после удаления сопутствующих веществ. Основными аминокислотами, обнаруженными в белковом изоляте, были глутаминовая и аспарагиновая кислоты, аланин, лейцин и треонин. Результаты экспериментов показали, что включение в технологический процесс стадии обез-

Таблица 4. Аминокислотный состав белков гороховой муки и образцов белкового изолята в зависимости от используемого растворителя на стадии обезжиривания сырья, г/100 г продукта

Table 4. Amino acid composition of pea flour proteins and protein isolate samples from different solvents, g/100 g

Показатель	Контроль		Белковый изолят из гороховой муки, обезжиренной различными растворителями		
	Гороховая мука	Белковый изолят из необработанной гороховой муки	н-гексан	Ацетон	Этанол
Незаменимые аминокислоты					
Валин	0,16 ± 0,02	1,81 ± 0,27	2,13 ± 0,32	2,36 ± 0,35	2,40 ± 0,36
Изолейцин	0,69 ± 0,10	2,82 ± 0,42	3,03 ± 0,45	3,45 ± 0,52	6,13 ± 0,92
Лейцин	0,66 ± 0,10	5,56 ± 0,83	6,43 ± 0,96	7,29 ± 1,09	7,61 ± 1,14
Лизин	0,65 ± 0,10	4,68 ± 0,70	5,37 ± 0,81	10,11 ± 1,52	9,57 ± 1,44
Метионин	0,53 ± 0,08	1,70 ± 0,26	1,69 ± 0,25	1,69 ± 0,25	2,45 ± 0,37
Треонин	0,85 ± 0,13	5,13 ± 0,77	4,86 ± 0,73	3,78 ± 0,57	3,23 ± 0,48
Фенилаланин	0,58 ± 0,09	3,78 ± 0,57	4,20 ± 0,63	4,89 ± 0,73	2,65 ± 0,40
Гистидин	0,34 ± 0,05	2,27 ± 0,34	2,95 ± 0,44	4,09 ± 0,61	2,10 ± 0,31
Сумма незаменимых аминокислот	4,46	27,75	30,66	37,66	36,14
Заменимые аминокислоты					
Аланин	0,43 ± 0,07	7,88 ± 1,18	9,01 ± 1,35	6,88 ± 1,03	5,88 ± 0,88
Аргинин	0,83 ± 0,13	2,19 ± 0,33	2,33 ± 0,35	3,57 ± 0,54	3,51 ± 0,53
Аспарагиновая кислота	0,68 ± 0,10	5,77 ± 0,87	7,15 ± 1,07	9,69 ± 1,45	12,05 ± 1,81
Глицин	0,21 ± 0,03	2,42 ± 0,36	2,91 ± 0,44	3,20 ± 0,48	2,85 ± 0,43
Глутаминовая кислота	13,55 ± 2,03	21,19 ± 3,18	18,32 ± 2,75	12,60 ± 1,89	14,00 ± 2,10
Пролин	0,55 ± 0,08	4,18 ± 0,63	4,70 ± 0,70	5,14 ± 0,77	6,26 ± 0,94
Серин	0,53 ± 0,08	3,71 ± 0,56	4,01 ± 0,60	3,55 ± 0,53	3,48 ± 0,52
Тирозин	0,66 ± 0,10	4,01 ± 0,60	3,51 ± 0,53	3,96 ± 0,59	3,61 ± 0,54
Цистин	0,25 ± 0,04	1,68 ± 0,25	2,05 ± 0,31	1,76 ± 0,26	1,82 ± 0,27
Сумма заменимых аминокислот	17,69	53,03	53,99	50,35	53,46

Примечание: данные представлены в виде среднего арифметического значения ± стандартное отклонение для группы n = 3 при доверительной вероятности $P \geq 0,95$. Средние значения в строках имеют значимые различия при уровне значимости $\alpha < 0,05$.

Note: The data are arithmetic means ± standard deviation (n = 3; $P \geq 0.95$). The mean values in the rows are significantly different at $\alpha < 0.05$.

жирования сырья влияет на аминокислотный профиль конечного продукта. Количество треонина, глутаминовой кислоты и тирозина снизилось во всех образцах, полученных из обезжиренной муки. Наблюдается снижение содержания отдельных аминокислот в белке: фенилаланина и гистидина – в белковом изоляте из гороховой муки, обезжиренной в этаноле, а также аланина и серина – в образцах из гороховой муки, обезжиренной ацетоном и этанолом. По-видимому, это связано с тем, что не все растительные белки, богатые данными аминокислотами, растворяются в щелочном растворе и затем осаждаются на стадии изоэлектрического осаждения после обработки сырья выбранными растворителями [56], что может быть вызвано денатурацией и утратой растворимости белковых молекул, изменяя конечный аминокислотный состав продукта. Напротив, содержание остальных аминокислот в образцах белкового изолята, полученных из обезжиренного сырья,

увеличилось, что положительно сказалось на суммарном количестве незаменимых аминокислот, определяющих пищевую и биологическую ценность белка.

Далее была изучена вторичная структура белков. Для ИК-спектра белка характерно наличие нескольких основных полос поглощения, которые соответствуют колебательным переходам в пептидной цепи. В таблице 5 представлены основные полосы поглощения функциональных групп белковых молекул.

Анализ ИК-Фурье-спектров показал, что изменение условий предварительной подготовки сырья (обезжиривание гороховой муки растворителями) в процессе получения белкового изолята не приводит к смещению пиков. Спектры типичны для белковых веществ и сопоставимы с данными для белковых изолятов из растительного сырья [59, 60].

Обезжиривание сырья в технологии получения белкового изолята с использованием органических

Таблица 5. Основные полосы поглощения функциональных групп белковых молекул

Table 5. Primary absorption bands of functional groups in protein molecules

Полоса	Частота, ν , см^{-1}	Тип
Amid A	3400–3300	валентные колебания атомов N–H связей
Amid B	3000–2900	валентные колебания атомов N–H связей
Amid I	1700–1600	валентные колебания связи C=O – 80 % и валентные колебания C–N
Amid II	1575–1480	деформационные колебания N–H связей – 80 % и валентные колебания C–N
Amid III	1300–1230	валентные колебания C–N

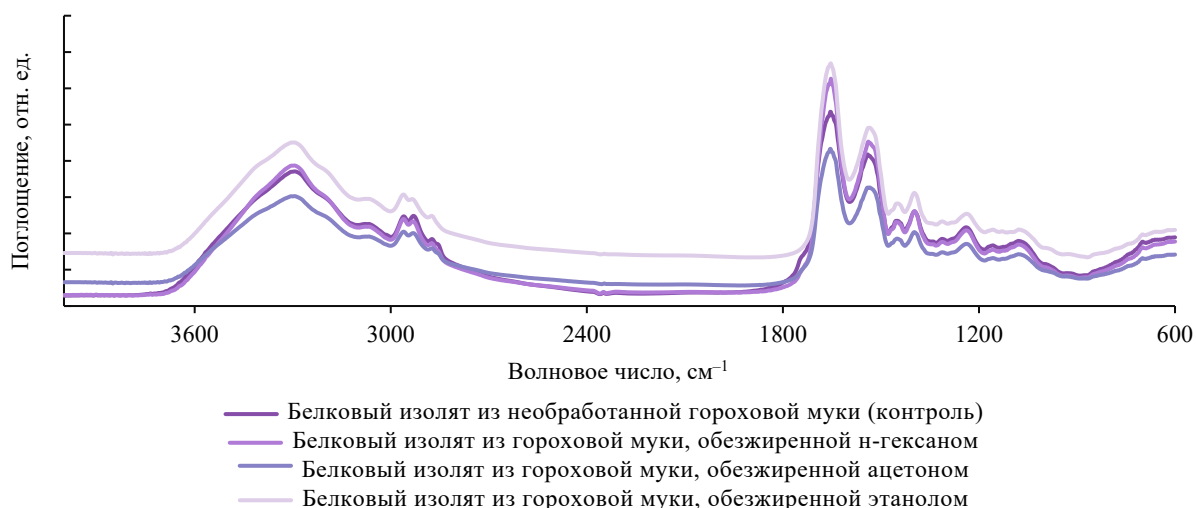


Рисунок 7. ИК-Фурье-спектры поглощения образцов белкового изолята в зависимости от растворителя, использованного для обезжиривания гороховой муки

Figure 7. IR-Fourier absorption spectra of protein isolate samples for different solvents

Таблица 6. Содержание основных компонентов полосы Амид I в образцах белковых изолятов из гороховой муки, обработанной различными растворителями, %

Table 6. Primary components of Amide I band in protein isolates from pea flour treated with various solvents, %

Разложение полосы Амид I		Образец			
Элемент вторичной структуры	ν , см^{-1}	Контроль	н-гексан	Ацетон	Этанол
β -повороты / β -слои	1626–1633	$17,4 \pm 0,8$	$9,1 \pm 0,6$	$20,1 \pm 1,0$	$15,4 \pm 0,7$
Неупорядоченные структуры (клубок)	1650–1655	$57,0 \pm 1,5$	$60,4 \pm 2,0$	$56,9 \pm 1,5$	$56,1 \pm 1,5$
α -спираль	1664–1676	$18,4 \pm 0,5$	$22,0 \pm 0,9$	$18,1 \pm 0,5$	$20,2 \pm 0,6$
β -повороты / β -слои	1685–1687	$5,6 \pm 0,2$	$6,4 \pm 0,3$	$7,8 \pm 0,3$	$6,3 \pm 0,3$
	1692–1694	$1,6 \pm 0,1$	$2,1 \pm 0,1$	$2,8 \pm 0,2$	$2,0 \pm 0,1$

Примечание: данные представлены в виде среднего арифметического значения $\pm$ стандартное отклонение для группы $n = 3$ при доверительной вероятности $P \geq 0,95$. Средние значения в строках имеют значимые различия при уровне значимости $\alpha < 0,05$.

Note: The data are arithmetic means $\pm$ standard deviation ($n = 3$; $P \geq 0.95$). The mean values in the rows are significantly different at $\alpha < 0.05$.

растворителей может вызывать изменения во вторичной, третичной и четвертичной структуре белков и их агрегатов. Растворители, как и другие денатурирующие факторы, нарушают слабые связи, стабилизирующие пространственную структуру белка, что приводит к потере его функциональности и возможной агрегации молекул. Межмолекулярные взаимодействия влияют на вторичную структуру белка, изменяя соотношение между различными конформационными состояниями участков молекулы белка: β -поворотами, β -слоями,

неупорядоченными структурами (клубок) и α -спиралями [61]. Известно, что полоса Амид I, соответствующая валентным колебаниям связей C=O полипептидной цепи, наиболее чувствительна к изменениям вторичной структуры.

Для анализа вторичной структуры белка был проведен анализ ИК-спектров методом второй производной в области поглощения полосы Амид I. С целью количественной оценки доли макромолекулярной цепи, находящейся в той или иной конформации, определяли

интегральную интенсивность соответствующих пиков. Для этого полосу Амид I раскладывали с помощью распределения Гаусса. В таблице 6 представлено содержание основных компонентов вторичной структуры белка (полоса Амид I) для образцов белкового изолята.

Анализ данных, представленных в таблице 6, показал, что предварительная обработка гороховой муки органическими растворителями не приводит к изменению вторичной структуры белков. Все образцы характеризуются одинаковым составом: количество неупорядоченных структур в 2,7–3,0 раза больше, чем количество α -спиралей.

Далее изучили влияние физико-химических свойств образцов белкового изолята на функционально-технологические показатели белков. Наиболее распространенным показателем при оценке качества белковых продуктов обычно является растворимость, которая зависит от pH среды, ионной силы, температуры, размера частиц препарата и условий его производства. Использование органических растворителей в процессе обезжиривания сырья позволяет эффективно удалить липиды и тем самым влияет на растворимость белка.

На рисунке 8 представлена растворимость образцов белкового изолята в воде. Полученные результаты показывают, что растворимость белкового продукта увеличилась на 4,3 % при использовании в качестве сырья для производства изолята гороховой муки, обезжиренной *n*-гексаном, на 4,0 % – гороховой муки, обезжиренной ацетоном, и на 38,0 % при использовании гороховой муки, обезжиренной этанолом. Наблюдаемое повышение растворимости можно объяснить тем, что обработка сырья растворителями удаляет липофильные вещества, образующие с белками комплексы, которые затрудняют гидратацию белка водой. В результате гидрофильные группы белка получают больший доступ к воде, что приводит к лучшему образованию гидратной оболочки вокруг молекул. Примечательно, что растворимость образца белкового изолята, полученного из гороховой муки, обработанной этанолом, является самой высокой в эксперименте (99,1 %). Известно, что гороховые белки главным образом состоят из альбуминов (8,0–21,5 %) и глобулинов (58,6–76,6 %) [28]. Вероятно, высокая растворимость данного белкового изолята в воде обусловлена тем, что он в основном состоит из водорастворимой фракции белков – альбуминов. В то же время большая часть глобулинов была денатурирована этанолом в процессе обезжиривания сырья и в дальнейшем, при получении белкового изолята, удалена при центрифугировании вместе с нерастворимым осадком. Полученные результаты согласуются с данными на рисунке 5, где самый низкий выход белка продемонстрировал образец белкового изолята из гороховой муки, обработанной этанолом.

Растворимость – важная характеристика высокобелковых продуктов, определяющая их дальнейшее применение, поскольку она влияет на другие функциональные свойства, такие как эмульгирующая спо-

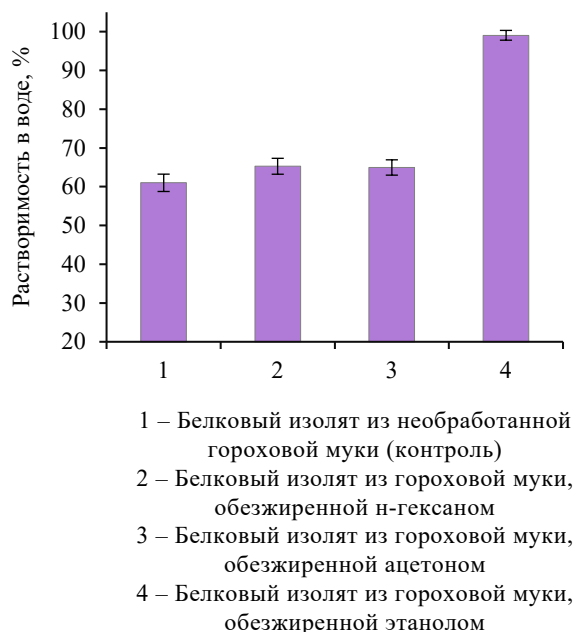


Рисунок 8. Изменение растворимости образцов белкового изолята в воде в зависимости от растворителя, использованного для обезжиривания муки

Figure 8. Water solubility of protein isolates for different solvents

собность, пенообразование и термические свойства. В дальнейшем предполагается продолжить комплексное исследование функционально-технологических свойств белкового изолята из гороховой муки при использовании его в рецептурах пищевых продуктов, например в качестве замены традиционных ингредиентов (яичных белков или мяса).

Завершающий этап исследования заключался в обобщении полученных результатов и определении наиболее эффективного растворителя в технологии получения белкового изолята из гороховой муки, который обеспечит высокую степень обезжиривания сырья, улучшение цвета, а также высокий выход продукта, содержание белка и хорошие функционально-технологические свойства. На рисунке 9 представлено изменение комплексного показателя качества обезжиривания, который представляет собой суммарную оценку эффективности от использования выбранных растворителей в технологии получения белкового изолята. Максимум комплексного показателя качества обезжиривания (67,8 %) наблюдался при применении ацетона. Это объясняется тем, что ацетон показал хорошие результаты при обезжиривании сырья, а его применение в производстве белкового изолята обеспечило высокий выход продукта и выход белка.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что использование в технологии получения изолята горохового белка стадии обезжиривания сырья увеличивает выход и концентрацию белковых веществ в конечном продукте за счет удаления липидов из горо-

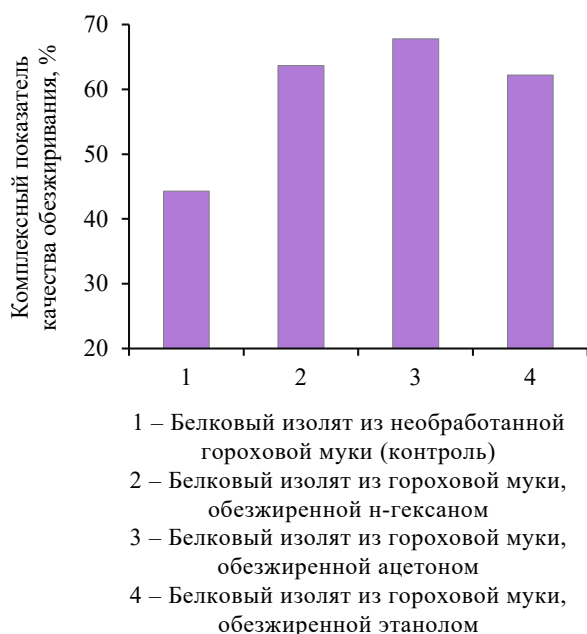


Рисунок 9. Изменение комплексного показателя качества обезжиривания гороховой муки в зависимости от используемого растворителя

Figure 9. Complex defatting quality indicator of pea flour for different solvents

хой муки, а также улучшает цвет, снижает интенсивность бобового аромата, повышает растворимость без существенного влияния на структуру белка. Данные результаты могут быть востребованы на пищевых предприятиях, занимающихся глубокой переработкой зернобобовых культур, для повышения эффективности использования сырья, получения ценных белковых ингредиентов и продуктов. Комплексная переработка гороха позволяет получить пищевые белки с возможностью извлечения целого ряда других сопутствующих продуктов: растительного масла, крахмала, пищевых волокон и др. Совершенствование таких технологий будет способствовать развитию пищевой отечественной отрасли в целом.

Выводы

Горох – перспективное растительное сырье для получения функциональных пищевых ингредиентов и продуктов питания на их основе благодаря высокому содержанию белка, включающего широкий спектр полезных для организма человека аминокислот.

В представленной работе определена возможность совершенствования технологии получения изолята горохового белка за счет обезжиривания сырья н-гексаном, ацетоном и этанолом. Данная обработка обеспечивает высокий уровень пищевой безопасности вследствие предотвращения образования и накопления в белковом изоляте продуктов гидролиза и окисления липидов. В результате проведенных исследований было установлено, что процесс обезжиривания положительно

влияет на физико-химические свойства гороховой муки и белковых изолятов: наблюдается улучшение цвета и повышение белизны, увеличивается содержания белка и незаменимых аминокислот, при этом сохраняется вторичная структура белковых молекул. Использование в технологии получения изолята обезжиренной муки, обработанной н-гексаном и ацетоном, позволяет добиться повышенного выхода продукта и белка. Растворимость продукта в воде вместе с тем увеличивается. Самую высокую растворимость в эксперименте показал образец белкового изолята из гороховой муки, обработанной этанолом. Следует отметить, что идеального растворителя не существует, поэтому необходимо искать компромисс между функциональными свойствами и высоким выходом продукта. Оценка комплексного показателя качества обезжиривания позволила определить, что оптимальным вариантом является применение ацетона для обработки сырья с точки зрения эффективности удаления жиров, обеспечения максимального выхода продукта и белка, а также улучшения цвета.

Результаты исследования носят предварительный характер, однако позволяют предположить, что создание новых видов пищевых продуктов с использованием разработанного белкового изолята позволит обогатить рацион питания человека незаменимыми аминокислотами, необходимыми для роста, восстановления и правильного функционирования организма, что существенно расширит возможности укрепления здоровья людей разных возрастных категорий.

Научная новизна работы заключается в получении пищевой продукта в виде белкового препарата – изолята белка из гороховой муки с высоким содержанием целевого компонента и улучшенными органолептическими показателями – за счет введения в технологию стадии обезжиривания сырья и выбора наиболее эффективного растворителя.

Критерии авторства

А. Ю. Глухарев – обоснование проблемы, определение цели и постановка задач, поиск и анализ литературных источников, проведение экспериментальной работы, анализ и описание полученных данных, подготовка и редактирование статьи. Ю. А. Кучина – проведение ИК-спектроскопии белков и анализ данных, описание результатов, редактирование текста статьи. С. Р. Деркач – научное консультирование, рецензирование и редактирование статьи. А. С. Князева, Д. А. Утянов – анализ аминокислотного состава образцов, описание результатов, редактирование текста статьи. Все авторы одобрили окончательный вариант рукописи и несут равную ответственность за целостность, достоверность материалов и отсутствие плагиата.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарности

Авторы выражают благодарность Министерству науки и высшего образования РФ за поддержку научно-исследовательской лаборатории «Химия и технология морских биоресурсов» Мурманского арктического университета, созданной в рамках национального проекта «Наука и университеты» (FENR-2024-0001, соглашение № 075-03-2024-024/1 от 15.02.24).

Contribution

A.Yu. Glukharev set the research goal, wrote the review, conducted the experimental work, analyzed the results, and wrote the manuscript. Yu.A. Kuchina conducted the IR spectroscopy and data analysis, described the results, and proofread the manuscript. S.R. Derkach provided scientific consulting and proofread the article. A.S. Knyazeva and D.A. Utianov analyzed the amino

acid composition, described the results, and proofread the manuscript. All authors approved the final version of the manuscript and share equal responsibility for its integrity, accuracy, and originality.

Conflict of interest

The authors reported no conflict of interest regarding the publication of this article.

Acknowledgments

The authors would like to thank the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation for the support of the Murmansk Arctic University's Chemistry and Technology of Marine Bioresources Research Laboratory, established as part of the national Science and Universities Project (FENR-2024-0001, Agreement No. 075-03-2024-024/1, March 15, 2024).

Список литературы / References

1. Глухарев А. Ю., Бордиян В. В., Кузина Т. Д., Кучина Ю. А., Деркач С. Р. Получение и использование белка из створок раковин мидий в сухом рыбном соусе. Пищевые системы. 2025. Т. 8. № 1. С. 134–143. [Glukharev AYu, Bordiyan VV, Kuzina TD, Kuchina YuA, Derkach SR. Production and use of mussel shell protein in dry fish sauce. Food Systems. 2025;8(1):134–143. (In Russ.)] <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-1-134-143>
2. Wan M-C, Qin W, Lei C, Li Q, Meng M, et al. Biomaterials from the sea: Future building blocks for biomedical applications. Bioactive Materials. 2021;6(12):4255–4285. <https://doi.org/10.1016/j.bioactmat.2021.04.028>
3. Wu G. Dietary protein intake and human health. Food & Function. 2016;7(3):1251–1265. <https://doi.org/10.1039/c5fo01530h>
4. Derkach SR, Grokhovsky VA, Kuranova LK, Volchenko VI. Nutrient analysis of underutilized fish species for the production of protein food. Foods and Raw Materials. 2017;5(2):15–23. <http://doi.org/10.21603/2308-4057-2017-2-15-23>
5. Derkach SR, Kuchina YA, Kolotova DS, Petrova LA, Volchenko VI, et al. Properties of protein isolates from marine hydrobionts obtained by isoelectric solubilisation/precipitation: Influence of temperature and processing time. International Journal of Molecular Sciences. 2022;23:14221. <https://doi.org/10.3390/ijms232214221>
6. Saeed F, Zohra KT, Naveed K, Zia A, Khaliq M, et al. Algal Proteins for sustainable nutrition and functional food innovation. Applied Food Research. 2025;100752. <https://doi.org/10.1016/j.afres.2025.100752>
7. Xu X, Sharma P, Shu S, Lin T, Ciais P, et al. Global greenhouse gas emissions from animal-based foods are twice those of plant-based foods. Nature Food. 2021;2(9):724–732. <https://doi.org/10.1038/s43016-021-00358-x>
8. Henchion M, Hayes M, Mullen AM, Fenelon M, Tiwari B. Future protein supply and demand: Strategies and factors influencing a sustainable equilibrium. Foods. 2017;6(7):53. <https://doi.org/10.3390/foods6070053>
9. Aidoo R, Abe-Inge V, Kwofie EM, Baum JI, Kubow S. Sustainable healthy diet modeling for a plant-based dietary transitioning in the United States. npj Science of Food. 2023;7:61. <https://doi.org/10.1038/s41538-023-00239-6>
10. Smith K, Watson AW, Lonnie M, Peeters WM, Oonincx D, et al. Meeting the global protein supply requirements of a growing and ageing population. European Journal of Nutrition. 2024;63:1425–1433. <https://doi.org/10.1007/s00394-024-03358-2>
11. Gharaviri M, Aleksanochkin DI, Ahangaran M, Fomenko IA, Kovalev LI, et al. Chickpea protein hydrolysates: Production, bioactivity, functional profile, and technological properties. Foods and Raw Materials. 2026;14(1):198–213. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2026-1-666>
12. Boukid F, Rosell CM, Castellari M. Pea protein ingredients: A mainstream ingredient to (re)formulate innovative foods and beverages. Trends in Food Science & Technology. 2021;110:729–742. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.02.040>
13. Meganaharshini M, Sudhakar V, Bharathi ND, Deepak S. Review on recent trends in the application of protein concentrates and isolates – a food industry perspective. Food and Humanity. 2023;1:308–325. <https://doi.org/10.1016/j.fooHum.2023.05.022>
14. Zhang T, Dou W, Zhang X, Zhao Y, Zhang Y, et al. The development history and recent updates on soy protein-based meat alternatives. Trends in Food Science & Technology. 2021;109:702–710. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.01.060>
15. Хрулёв А. А., Бесчетникова Н. А., Федотов И. А. Тенденции развития и экономические аспекты производства горохового протеина. Пищевая промышленность. 2016. № 4. С. 24–29. [Khrulyov AA, Beschetikova NA, Fedotov IA. Development tendencies and economic aspects of the pea protein production. Food Industry. 2016;4:24–29. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/TWSNMN>

16. Aschemann-Witzel J, Gantriis RF, Fraga P, Perez-Cueto FJA. Plant-based food and protein trend from a business perspective: Markets, consumers, and the challenges and opportunities in the future. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2020;61(18):3119–3128. <https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1793730>
17. Ismail BP, Senaratne-Lenagala L, Stube A, Brackenridge A. Protein demand: Review of plant and animal proteins used in alternative protein product development and production. *Animal Frontiers*. 2020;10(4):53–63. <https://doi.org/10.1093/af/vfaa040>
18. Shanthakumar P, Klepacka J, Bains A, Chawla P, Dhull SB, *et al.* The current situation of pea protein and its application in the food industry. *Molecules*. 2022;27:5354. <https://doi.org/10.3390/molecules27165354>
19. Taylor SL, Baumert JL. Worldwide food allergy labeling and detection of allergens in processed foods. *Chemical Immunology and Allergy*. 2015;101:227–234. <https://doi.org/10.1159/000373910>
20. Guillin FM, Gaudichon C, Guérin-Deremaux L, Lefranc-Millot C, Azzout-Marniche D, *et al.* Multi-criteria assessment of pea protein quality in rats: A comparison between casein, gluten and pea protein alone or supplemented with methionine. *British Journal of Nutrition*. 2021;125(4):389–397. <https://doi.org/10.1017/S0007114520002883>
21. Guillin FM, Gaudichon C, Guérin-Deremaux L, Lefranc-Millot C, Airinei G, *et al.* Real ileal amino acid digestibility of pea protein compared to casein in healthy humans: A randomized trial. *The American Journal of Clinical Nutrition*. 2022;115(2):353–363. <https://doi.org/10.1093/ajcn/nqab354>
22. Porzucek H, Larsson-Raźnikiewicz M, Klepacka M. *In vitro* protein digestibility of flours and protein isolates from seeds of some leguminous plants. *Swedish Journal of Agricultural Research*. 1991;21(2):49–53.
23. Melchior S, Moretton M, Alongi M, Calligaris S, Nicoli MC, Anese M. Comparison of protein *in vitro* digestibility under adult and elderly conditions: The case study of wheat, pea, rice, and whey proteins. *Food Research International*. 2023;163:112147. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.112147>
24. Santos-Hernández M, Alfieri F, Gallo V, Miralles B, Masi P, *et al.* Compared digestibility of plant protein isolates by using the INFOGEST digestion protocol. *Food Research International*. 2020;137:109708. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109708>
25. Taylor SL, Marsh JT, Koppelman SJ, Kabourek JL, Johnson PE, *et al.* A perspective on pea allergy and pea allergens. *Trends in Food Science & Technology*. 2021;116:186–198. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.07.017>
26. Abi-Melhem R, Hassoun Y. Is pea our hidden allergen? An American pediatric case series. *Journal of Allergy and Clinical Immunology: Global*. 2023;2(2):100090. <https://doi.org/10.1016/j.jacig.2023.100090>
27. Ивашенко Л. В., Амбарцумов Т. Г., Захарова У. Е. Анализ возможности производства горохового изолята: материалы XII конгресса молодых ученых. Санкт-Петербург, 2023. С. 26–28. [Ivashchenko LV, Ambartsumov TG, Zakharova UE. Analysis of the possibility of producing pea isolate: Proceedings of the XII Congress of Young Scientists. Saint Petersburg, 2023;26–28. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/HORZXH>
28. Колпакова В. В., Куликов Д. С., Уланова Р. В., Чумикина Л. В. Пищевые и кормовые белковые препараты из гороха и нута: производство, свойства, применение. *Техника и технология пищевых производств*. 2021. №. 2. С. 333–348. [Kolpakova VV, Kulikov DS, Ulanova RV, Chumikina LV. Food and feed protein preparations from peas and chickpeas: Production, properties, application. *Food Processing: Techniques and Technology*. 2021;51(2):333–348. (In Russ.)] <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-2-333-348>
29. Береулов М. III. Основы переработки семян сои. М.: ДеЛи принт, 2006. 181 с. [Begeulov MSh. Fundamentals of soybean seed processing. Moscow: DeLi print; 2006. 181 p. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/QNGPGD>
30. Долгополов В. Г. Растительный белок. М.: Агропромиздат, 1991. 684 с. [Dolgoplov VG. Vegetable protein. Moscow: Agropromizdat; 1991. 684 p. (In Russ.)]
31. Gao Z, Shen P, Lan Y, Cui L, Ohm JB, *et al.* Effect of alkaline extraction pH on structure properties, solubility, and beany flavor of yellow pea protein isolate. *Food Research International*. 2020;131:109045. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109045>
32. Vogelsang-O'Dwyer M, Zannini E, Arendt EK. Production of pulse protein ingredients and their application in plant-based milk alternatives. *Trends in Food Science & Technology*. 2021;110:364–374. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.01.090>
33. Alemu TM, Janssen AE, Padt A, Boom RM. Micro-and ultrafiltration of pea proteins from a water-only extraction process. *Separation and Purification Technology*. 2025;133663. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2025.133663>
34. Sharma S, Kaur M, Goyal R, Gill BS. Physical characteristics and nutritional composition of some new soybean (*Glycine max* (L.) Merrill) genotypes. *Journal of Food Science and Technology*. 2014;51(3):551–557. <https://doi.org/10.1007/s13197-011-0517-7>
35. Esteves EA, Martino HSD, Oliveira FCE, Bressan J, Costa NMB. Chemical composition of a soybean cultivar lacking lipoxygenases (LOX2 and LOX3). *Food Chemistry*. 2010;122(1):238–242. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.02.069>
36. Gravel A, Marciniak A, Couture M, Doyen A. Effects of hexane on protein profile, solubility and foaming properties of defatted proteins extracted from *Tenebrio molitor* larvae. *Molecules*. 2021;26(2):351. <https://doi.org/10.3390/molecules26020351>
37. Trindler C, Kopf-Bolanž KA, Denkel C. Aroma of peas, its constituents and reduction strategies – effects from breeding to processing. *Food Chemistry*. 2022;376:131892. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.131892>

38. Wang D, Xiao H, Lyu X, Chen H, Wei F. Lipid oxidation in food science and nutritional health: A comprehensive review. *Oil Crop Science*. 2023;8(1):35–44. <https://doi.org/10.1016/j.ocsci.2023.02.002>
39. Gravel A, Dubois-Laurin F, Doyen A. Effects of hexane on protein profile and techno-functional properties of pea protein isolates. *Food Chemistry*. 2023;406:135069. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.135069>
40. L'hocine L, Boye JI, Arcand Y. Composition and functional properties of soy protein isolates prepared using alternative defatting and extraction procedures. *Journal of Food Science*. 2006;71(3):137–145. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2006.tb15609.x>
41. Dirr S, Karslioglu OO, Ates EG, Oztop MH. Defatting strategies for chia protein production: Effects on physicochemical properties. *Future Foods*. 2025;100729. <https://doi.org/10.1016/j.fufo.2025.100729>
42. Russin TA, Boye JI, Arcand Y, Rajamohamed SH. Alternative techniques for defatting soy: A practical review. *Food and Bioprocess Technology*. 2011;4(2):200–223. <https://doi.org/10.1007/s11947-010-0367-8>
43. Апыянцева Ю. В., Борисова И. И., Бараненко Д. А. Обзор технологий выделения белка из нута. *Ползуновский вестник*. 2024. № 2. С. 27–36. [Apyantseva YV, Borisova II, Baranenko DA. A review of chickpea isolation technology. *Polzunovskiy Vestnik*. 2024;(2):27–36. (In Russ.)] <https://doi.org/10.25712/astu.2072-8921.2024.02.004>
44. Berghout JAM, Boom RM, Van Der Goot AJ. The potential of aqueous fractionation of lupin seeds for high-protein foods. *Food Chemistry*. 2014;159:64–70. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.02.166>
45. Wanniarachchi PC, Mocerino M, Hackett MJ, Nesbit M, Shea G, et al. Comparative analysis of thermal, structural and rheological properties of protein isolates and kernel flour from Australian sweet lupin varieties using soy as a reference. *Food Hydrocolloids*. 2026;172(Part 2):112000. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2025.112000>
46. Liang G, Chen W, Guo K, Zhaojun W, Qiuming C, et al. The impact of pH-shifting and heat treatment on soy protein isolates: Structural changes and foaming properties. *Food Bioscience*. 2025;74:107844. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2025.107844>
47. Capellini MC, Giacomini V, Cuevas MS, Rodrigues CE. Rice bran oil extraction using alcoholic solvents: Physicochemical characterization of oil and protein fraction functionality. *Industrial Crops and Products*. 2017;104:133–143. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.04.017>
48. Никифорова Т. А., Севериненко С. М., Куликов Д. А., Пономарев С. Г. Потенциальные возможности побочных продуктов крупяных производств. *Вестник Оренбургского государственного университета*. 2010. № 5 (111). С. 141–144. [Nikiforova TA, Severinenko SM, Kulikov DA, Ponomarev SG. Potentialities of cereal industries by-products. *Vestnik Orenburg State University*. 2010;5(111):141–144. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/MSOJSD>
49. Wei S-T, Ou L-C, Luo MR, Hutchings JB. Optimisation of food expectations using product colour and appearance. *Food Quality and Preference*. 2012;23(1):49–62. <https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2011.07.004>
50. Edelenbos M, Christensen LP, Grevsen K. HPLC determination of chlorophyll and carotenoid pigments in processed green pea cultivars (*Pisum sativum* L.). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2001;49(10):4768–4774. <https://doi.org/10.1021/jf010569z>
51. Cheng M, McPhee KE, Baik BK. Bleaching of green peas and changes in enzyme activities of seeds under simulated climatic conditions. *Journal of Food Science*. 2004;69(7):511–518. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2004.tb13644.x>
52. Steet JA, Tong CH. Degradation kinetics of green color and chlorophylls in peas by colorimetry and HPLC. *Journal of Food Science*. 1996;61(5):924–928. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1996.tb10903.x>
53. Ashokkumar K, Diapari M, Jha AB, Tar'an B, Arganosa G, et al. Genetic diversity of nutritionally important carotenoids in 94 pea and 121 chickpea accessions. *Journal of Food Composition and Analysis*. 2015;43:49–60. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2015.04.014>
54. Ashokkumar K, Tar'an B, Diapari M, Arganosa G, Warkentin TD. Effect of cultivar and environment on carotenoid profile of pea and chickpea. *Crop Science*. 2014;54(5):2225–2235. <https://doi.org/10.2135/cropsci2013.12.0827>
55. Ndiritu AK, Kinyuru JN, Kenji GM, Gichuhi PN. Extraction technique influences the physico-chemical characteristics and functional properties of edible crickets (*Acheta domesticus*) protein concentrate. *Journal of Food Measurement and Characterization*. 2017;11(4):2013–2021. <https://doi.org/10.1007/s11694-017-9584-4>
56. Senarathna SC, Malalgoda M. Impact of defatting method on oat protein isolate structure-function characteristics. *Journal of Cereal Science*. 2024;117:103876. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2024.103876>
57. Feng Y, Ma X, Kong B, Chen Q, Liu Q. Ethanol induced changes in structural, morphological, and functional properties of whey proteins isolates: Influence of ethanol concentration. *Food Hydrocolloids*. 2021;111:106379. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106379>
58. Tan JX, Tan CC, Dharmawan J, Leong SSJ. Effects of ethanol washing on off-flavours removal and protein functionalities of pea protein concentrate. *Food and Bioprocess Technology*. 2023;141:73–80. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2023.07.004>
59. Ma H, Li J, Guan Y, Song Z, Chen H, et al. A systematic study of the influence of structural differences in soy protein isolates on gel properties: A comparison based on different cultivars. *Food Bioscience*. 2025;69:106987. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2025.106987>

60. Hanley L, Dobson S, Stobbs J, Marangoni AG. Physicochemical and functional characterization of plant protein isolates and their influence on plant-based mozzarella cheese performance. *Food Hydrocolloids*. 2025;164:111222. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2025.111222>
61. Derkach SR, Voron'ko NG, Sokolan NI, Kolotova DS, Kuchina YA. Interactions between gelatin and sodium alginate: UV and FTIR studies. *Journal of Dispersion Science and Technology*. 2019;41(5):690–698. <https://doi.org/10.1080/01932691.2019.1611437>

Дополнительная информация об авторах / Additional information about the authors

Глухарев Андрей Юрьевич / Andrei Yu. Glukharev ORCID 0000-0002-6083-546X; eLIBRARY SPIN 8485-0558
Кучина Юлия Анатольевна / Yuliya A. Kuchina ORCID 0000-0003-3419-1442; eLIBRARY SPIN 3121-3735
Деркач Светлана Ростиславовна / Svetlana R. Derkach ORCID 0000-0002-5871-9320; eLIBRARY SPIN 2263-7685
Князева Александра Сергеевна / Alexandra S. Knyazeva ORCID 0000-0002-3754-0938; eLIBRARY SPIN 5380-5932
Утьянов Дмитрий Александрович / Dmitry A. Utyanov ORCID 0000-0001-7693-3032; eLIBRARY SPIN 5859-6339

<https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-2-2637>
<https://elibrary.ru/DPVOFG>

Оригинальная статья
<https://fptt.ru>

Влияние растительных полуфабрикатов и добавок на качество напитков



О. В. Голуб^{1,*}, А. М. Захаренко^{1,2}, Н. В. Мотовилова¹,
О. К. Мотовилов¹, К. С. Голохваст¹

¹ Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий Российской академии наук, Красноярск, Россия

² Национальный исследовательский Томский государственный университет , Томск, Россия

Поступила в редакцию: 21.01.2026

Принята после рецензирования: 24.02.2026

Принята к публикации: 10.03.2026

*e-mail: golubov@sfscs.ru

© О. В. Голуб, А. М. Захаренко, Н. В. Мотовилова,
О. К. Мотовилов, К. С. Голохваст, 2026



Аннотация.

Разработка безалкогольных напитков на растительной основе представляет значительный научный и практический интерес в связи с растущим спросом на продукты, сочетающие приятные органолептические свойства и оздоровительный эффект. Цель исследования – комплексно оценить влияние рецептурных факторов (вида растительного сырья, типа подслащающих веществ и обогащения аскорбиновой кислотой) на формирование качества, функциональных свойств и стабильность безалкогольных напитков в процессе хранения.

Объекты исследования – полуфабрикаты из растительного сырья (кофе жареный молотый, листья мяты перечной, трубочки корицы цейлонской и корни дикорастущей родиолы розовой) и напитки на их основе, а также пищевые ингредиенты (сахарный сироп, растворы лимонной кислоты, колер, сукралоза, аскорбиновая кислота). В работе использовали стандартные физико-химические, микробиологические и спектрофотометрические методы анализа. Органолептическую оценку проводили по разработанной 5-балльной шкале. Статистическую обработку данных выполняли с помощью дисперсионного и корреляционного анализов.

Установлено, что разработанные 12 рецептов напитков варьируются по трем факторам. Полуфабрикат из растительного сырья (настои жареного молотого кофе, листьев перечной мяты, трубочек корицы, CO₂-экстракт корней родиолы розовой) определял содержание сухих веществ, полифенольных соединений, флавоноидов, цветовые координаты ($\eta_p^2 = 89,7\text{--}99,6\%$), количество мезофильных аэробных и факультативно-анаэробных микроорганизмов ($\eta_p^2 = 26,5\%$) и органолептические характеристики ($\eta_p^2 = 50,2\text{--}52,2\%$). Характер подслащающих веществ (сахароза или сукралоза) влиял на содержание сухих веществ ($\eta_p^2 = 100,0\%$), КМАФАнМ ($\eta_p^2 = 42,3\%$), флавоноидов ($\eta_p^2 = 24,0\%$), а также показатели на цвета L^* , a^* , H° ($\eta_p^2 = 41,9\text{--}56,2\%$). Обогащение аскорбиновой кислотой ($\eta_p^2 = 99,9\%$) обеспечивало содержание витамина С в напитках не менее 15 мг/100 см³ продукции, влияло на показатели цвета b^* , C^* и на содержание сухих веществ ($\eta_p^2 = 17,4\text{--}26,5\%$). В течение 7 суток хранения напитки сохраняли приемлемые органолептические характеристики и микробиологическую безопасность, а варианты, обогащенные аскорбиновой кислотой, – функциональные свойства.

Напитки на сукралозе являются «безкалорийными» (≤ 4 ккал/100 см³). Порция 200 см³ напитков, фортифицированных аскорбиновой кислотой, обеспечивает не менее 30 % суточной потребности в витамине С. Результаты работы вносят значительный вклад в разработку современных функциональных продуктов питания.

Ключевые слова. Безалкогольные напитки, растительное сырье, сукралоза, аскорбиновая кислота, функциональные продукты, стабильность

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 0533-2024-0005).

Для цитирования: Голуб О. В., Захаренко А. М., Мотовилова Н. В., Мотовилов О. К., Голохваст К. С. Влияние растительных полуфабрикатов и добавок на качество напитков. Техника и технология пищевых производств. 2026. Т. 56. № 2. С. 296–316.
<https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-2-2637>

Effect of Plant-Based Semi-Finished Products and Additives on the Beverages Quality



Olga V. Golub^{1,*}, Alexander M. Zakharenko^{1,2},
Natalya V. Motovilova¹, Oleg K. Motovilov¹,
Kirill S. Golokhvast¹

¹ Siberian Federal Research Centre of Agro-BioTechnologies of the Russian Academy of Sciences,
Krasnoobsk, Russia

² Tomsk State University , Tomsk, Russia

Received: 21.01.2026

Revised: 24.02.2026

Accepted: 10.03.2026

*e-mail: golubov@sfsca.ru

© O.V. Golub, A.M. Zakharenko, N.V. Motovilova, O.K. Motovilov,
K.S. Golokhvast, 2026



Abstract.

The market of plant-based soft drinks responds to the growing demand for functional products that combine pleasant sensory properties with health benefits. This article describes the impact of formulation factors (raw material, sweetener, ascorbic acid) on the quality, functional properties, and stability of plant-based soft drinks during storage.

The study featured plant-based semi-finished products combined into 12 beverage formulations. They were subjected to standard physicochemical, microbiological, and spectrophotometric analytical methods. The sensory assessment involved a five-point scale. The statistical data processing relied on the analyses of variance and correlation.

The beverages varied in three factors. The semi-finished plant material (coffee infusions, cinnamon, *Rhodiola rosea* CO₂-extract) determined the content of solids, phenolic compounds, flavonoids, color coordinates ($\eta_p^2 = 89.7\text{--}99.6\%$), QMAFAnM ($\eta_p^2 = 26.5\%$), and sensory properties ($\eta_p^2 = 50.2\text{--}52.2\%$). The sweetening agent (sucrose/sucralose) affected the content of solids and sucralose ($\eta_p^2 = 100.0\%$), QMAFAnM ($\eta_p^2 = 42.3\%$), flavonoids ($\eta_p^2 = 24.0\%$), and the color indicators L^* , a^* , H° ($\eta_p^2 = 41.9\text{--}56.2\%$). Ascorbic acid ($\eta_p^2 = 99.9\%$) ensured at least 15 mg of vitamin C per 100 cm³ of the finished product. It also affected the b^* , C^* indicators and solids ($\eta_p^2 = 17.4\text{--}26.5\%$). The beverages retained acceptable sensory profile, functional properties, and microbiological safety over 7 days of storage.

The experimental sucralose-based beverages proved to be low-calorie functional drinks able to ensure glycemic control. A 200 cm³ serving, fortified with ascorbic acid, delivered 30% of the recommended daily intake of Vitamin C. These findings contribute to the diversification of the functional food market.

Keywords. Soft drinks, plant-based ingredients, sucralose, ascorbic acid, functional foods, stability

Funding. The research was part of State Assignment from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (No. 0533-2024-0005).

For citation. Golub OV, Zakharenko AM, Motovilova NV, Motovilov OK, Golokhvast KS. Effect of Plant-Based Semi-Finished Products and Additives on the Beverages Quality. Food Processing: Techniques and Technology. 2026;56(2):296–316. (In Russ.) <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-2-2637>

Введение

Напитки – неотъемлемый элемент системы питания человека, обеспечивающий гидратацию организма, поддержание водно-электролитного баланса и поступление необходимых нутриентов. В последние годы наблюдается устойчивый рост интереса к функциональным напиткам, обладающим полезными свойствами. Данная тенденция обусловлена повышением пищевой грамотности населения, ростом распространенности алиментарно-зависимых заболеваний и усилением профилактической направленности в вопросах питания. Перспективным направлением пищевой науки

является разработка функциональных напитков, соответствующих научно обоснованным рекомендациям по питанию и требованиям национальных нормативных документов, в частности Федерального закона от 2 января 2000 г. № 29-ФЗ «О качестве и безопасности пищевых продуктов».

Растительное сырье традиционно используется при изготовлении напитков, т. к. оно содержит вещества (полифенольные соединения, витамины и др.), определяющие их физиологическую ценность и органолептические характеристики готового продукта [1–3]. К числу наиболее перспективных видов сырья для создания

функциональных напитков относят кофе (*Coffea* spp.), мяту (*Mentha* spp.), родиолу розовую (*Rhodiola rosea* L.) и корицу (*Cinnamomum verum*).

Кофейные зерна – сложная многокомпонентная система. Помимо кофеина, кофе – источник полифенольных соединений, прежде всего хлорогеновых кислот, проявляющих антиоксидантную, гепатопротекторную, гипогликемическую и противовоспалительную активность [4, 5]. Органолептические свойства продуктов переработки кофе, как и других растительных сырьевых материалов (например плодов можжевельника), формируются в процессе обжарки в результате реакций Майяра, карамелизации и деградации полифенольных соединений [4, 6, 7]. Степень обжарки зерен кофе коррелирует с антиоксидантной активностью, однако при интенсивной термической обработке возможны деградация части хлорогеновых кислот и образование нежелательных соединений, таких как акриламид [4]. Таким образом, продукты переработки кофе служат источником не только функциональных компонентов, но и органолептической основы для напитков.

Мята, в частности перечная, ценится за высокое содержание эфирного масла, основными компонентами которого служат ментол, ментон, пулегон и лимонен [8, 9]. Ментол обладает местноанестезирующим, спазмолитическим и охлаждающим эффектом [10, 11]. Помимо терпеноидов, мята содержит флавоноиды и фенолкарбоновые кислоты, вносящие вклад в общую антиоксидантную активность [8, 11]. Использование продуктов переработки мяты позволяет придать напитку освежающий вкус и аромат, а также дополнить его биологически активными соединениями с седативным и противовоспалительным потенциалом [3, 11].

Родиола розовая – классический адаптоген. Ее основные биологически активные компоненты – салидрозид и производные коричневого спирта (розавин, розарин, розин) [12, 13]. Указанные соединения повышают устойчивость организма к стрессам, а также обладают нейропротекторным и стимулирующим действием [10, 12]. Вкус продуктов переработки родиолы – горьковатый, вяжущий, что требует контролируемого купажирования с другими компонентами.

Корица широко используется как вкусо-ароматическая добавка. Коричный альдегид – основное биологически активное соединение корицы, которому приписывают антидиабетические свойства [14]. Помимо этого, корица содержит проантоцианидины и фенольные кислоты, определяющие ее высокую антиоксидантную активность [14, 15]. Сладковато-пряный аромат и жгучий вкус, наряду с антидиабетическим [14] и антиоксидантным [15] потенциалом, делают продукты переработки корицы ценными полуфабрикатами для создания функциональных напитков, что соответствует современному подходу к использованию биологически активных пряностей в пищевых технологиях [16].

Интеграция биологически активных соединений в жидкие пищевые матрицы сопряжена с технологи-

ческими сложностями. Выбор метода получения продукта переработки оказывает определяющее влияние на состав целевых компонентов, органолептические свойства и функциональную эффективность готовой продукции [2, 17]. Традиционный метод настаивания характеризуется низкой технологической сложностью, но имеет недостатки: длительное время, деградацию термолабильных соединений, потерю летучих веществ и риск микробиологической порчи [2, 18]. В связи с этим в пищевых технологиях наблюдается активный переход к современным методам, например сверхкритической флюидной экстракции диоксидом углерода [9, 19] и другим технологиям низкотемпературной обработки. Эти подходы способствуют целенаправленному регулированию цвета [20] и сохранению термолабильных биологически активных соединений [21], что существенно для качества функциональных напитков.

Основные преимущества сверхкритической флюидной экстракции диоксидом углерода – селективность, позволяющая направленно экстрагировать целевые группы соединений, отсутствие термической деградации и следов растворителя; высокий выход и сохранность аромата [22, 23]. Данный метод позволяет эффективно извлекать салидрозид и розавин из родиолы розовой [13], а также получать мятное масло с более полным составом летучих веществ [9]. Применение CO₂-экстрактов обеспечивает усиление вкусо-ароматических характеристик и высокую концентрацию биологически активных веществ. Использование экстрактов с минимальным количеством балластных веществ – общепризнанный подход к сохранению качества и повышению стабильности функциональных напитков [2, 24].

Разработка напитков требует, прежде всего, формирования сбалансированного вкуса. В современных условиях основное внимание уделяется поиску альтернатив сахарозе, обеспечивающих снижение энергетической ценности напитков. Интенсивные подсластители, такие как сукралоза, позволяют значительно уменьшить калорийность. Подсластитель технологически стабилен в широком диапазоне pH и при термообработке, что гарантирует неизменность уровня сладости в течение срока годности [25, 26].

Однако полная замена сахарозы сопряжена с проблемами: потерей «тела» напитка и появлением «водянистости» [27]. Кроме того, исследования показывают, что сахароза может положительно влиять на стабильность отдельных биологически активных веществ, например антоцианов, благодаря своим антиоксидантным свойствам или способности модулировать окислительно-восстановительную среду [28, 29]. Поэтому наилучшие результаты часто показывают комбинированные системы подсластителей, которые нивелируют недостатки каждого компонента и помогают добиться органолептических показателей, близких к традиционному продукту [25, 30].

Для обеспечения стабильности функциональных напитков, особенно обогащенных соединениями,

чувствительными к окислению, необходимо применение антиоксидантов. Аскорбиновая кислота отличается универсальностью и высокой эффективностью благодаря многогранному механизму: связыванию кислорода, прерыванию цепных реакций окисления, регенерации других антиоксидантов и ингибированию ферментативного потемнения [19, 31, 32]. Многочисленные исследования подтверждают ее вклад в сохранении витаминного состава, стабилизации цвета и поддержании антиоксидантной активности напитков [33, 34], доказывая эффективность рецептурных ингредиентов в повышении стабильности пищевых систем [35].

Таким образом, современная разработка функциональных безалкогольных напитков представляет собой комплексную задачу. Качество, стабильность и потребительские свойства готового продукта являются интегральным результатом взаимного влияния выбора полуфабриката из растительного сырья, типа используемой системы подслащивания и применения обогащающих добавок. Несмотря на это, степень влияния каждого из этих рецептурных факторов и их комбинаций на органолептические, физико-химические показатели и на сохранность функциональных свойств в течение срока хранения изучена недостаточно и требует целенаправленного системного исследования. В связи с этим цель исследования – комплексно оценить влияние рецептурных факторов (вида растительного сырья, типа подслащивающих веществ и обогащения аскорбиновой кислотой) на формирование качества, функциональных свойств и стабильность безалкогольных напитков в процессе хранения.

Объекты и методы исследования

Объекты исследования – полуфабрикаты из растительного сырья и напитки на их основе. Технологический процесс производства напитков включал в себя подготовку сырья (получение настоев или экстракта из растительного сырья, сахарного сиропа, растворов лимонной кислоты, колера, сукралозы, аскорбиновой кислоты), изготовление купажного сиропа, дозирование купажного сиропа в ПЭТ-бутылки объемом 0,5 дм³ и заполнение их питьевой водой, герметизацию, смешивание, бракераж и хранение (температура 4 ± 2 °С, относительная влажность воздуха не более 75 %, в течение 8 суток). Отбор проб для испытаний проводили на 0, 7 и 8 сутки хранения.

Для получения настоев сырье измельчали до размера частиц 1–2 мм, заливали питьевой водой температурой 92 ± 2 °С при гидромодуле 1:20 и экстрагировали на водяной бане в течение 17 ± 2 мин, поддерживая температуру смеси 90 ± 2 °С (без кипения), что позволяло интенсифицировать извлечение водорастворимых компонентов и обеспечить воспроизводимость условий. Затем смесь охлаждали до 20 ± 2 °С и настаивали при этой температуре в течение 120 ± 5 мин при периодическом перемешивании (температура выбрана как комнатная для унификации условий для всех видов

сырья и снижения риска термодеструкции или потерь летучих соединений), после чего фильтровали через капроновое сито № 46. Контроль процесса осуществляли по соблюдению размера частиц, соотношения сырье:вода, времени и температуры на каждом этапе, а также по показателям массовой доли растворимых сухих веществ и кислотности полученных настоев.

Для получения CO₂-экстракта корней родиолы розовой сырье измельчали до размера частиц 1–2 мм, загружали в систему сверхкритической флюидной экстракции Thar SFE-500F-2-FMC50 (Thar Technology Inc., США) и экстрагировали при давлении 350 бар и температуре 60 °С. В качестве со-растворителя использовали этанол, количество которого составляло 1 % в жидкой фазе [13]. Полученный CO₂-экстракт переводили в 70 % (об.) водно-спиртовую смесь путем добавления рассчитанного количества этанола 96 % (об.) и воды, после чего использовали при проведении исследований.

Для исследований применяли сырье, включающее компоненты растительного происхождения: жареный молотый кофе «Жокей по-восточному» (ООО «Орими КФ», Россия), листья мяты перечной (*Mentha piperita* L.) (ООО «Натрули», Россия), трубочки корицы цейлонской (*Cinnamomum zeylanicum* Blume) (ИП Ахметов А. Н., Россия), корни дикорастущей родиолы розовой (*Rhodiola rosea* L.) (оз. Байкал, Россия), а также пищевые ингредиенты, используемые в производстве напитков.

Качество и безопасность полуфабрикатов из растительного сырья и напитков оценивали по комплексу физико-химических и микробиологических показателей. В работе использовали методы испытаний в зависимости от состава продукции: для настоев и напитков на водной основе применяли методы контроля продукции безалкогольной промышленности, для CO₂-экстракта корней родиолы розовой, представленного 70 % водно-спиртовой смесью, – методы для водно-спиртовых растворов с приведением результатов к сопоставимым единицам. Массовую долю растворимых сухих веществ в настоях и напитках устанавливали по ГОСТ 6687.2-90 «Продукция безалкогольной промышленности. Методы определения сухих веществ». Для CO₂-экстракта сухой остаток находили гравиметрически по ОФС.1.4.1.0019.15 «Настойки» (результат выражали в %). Титруемую кислотность в настоях и напитках измеряли по ГОСТ 6687.4-86 «Напитки безалкогольные, квасы и сиропы. Метод определения кислотности». Для водно-спиртового раствора задействовали ГОСТ 32080-2013 «Изделия ликероводочные. Правила приемки и методы анализа» с представлением результатов в единицах см³ NaOH (1 моль/дм³) на 100 см³ продукта.

Витамин С в настоях и напитках определяли согласно ГОСТ 24556-89 «Продукты переработки плодов и овощей. Методы определения витамина С», в CO₂-экстракте – по ОФС.1.2.3.0017.15 «Методы количественного определения витаминов» (титриметрическим методом) с предварительным удалением этанола

перед титрованием. Сукралозу контролировали согласно ГОСТ EN 16155-2015 «Продукты пищевые. Определение сукралозы методом высокоэффективной жидкостной хроматографии» в вариантах напитков, где она предусмотрена рецептурой. Кофеин выявляли по ГОСТ 30059-93 «Напитки безалкогольные. Методы определения аспартама, сахарина, кофеина и бензоата натрия». Микробиологические показатели для напитков контролировали по ГОСТ 30712-2001 «Продукты безалкогольной промышленности. Методы микробиологического анализа», бактерии рода *Salmonella* – в соответствии ГОСТ 31659-2012 (ISO 6579:2002) «Продукты пищевые. Метод выявления бактерий рода *Salmonella*».

Содержание этилового спирта в напитках определяли, используя ГОСТ 6687.7-88 «Напитки безалкогольные и квасы. Метод определения спирта», в CO_2 -экстракте – ОФС.1.2.3.0034 «Содержание этанола» (метод 1 – дистилляции с последующим определением плотности дистиллята при $20,0 \pm 0,1$ °C по алкоголеметрическим таблицам). Общие содержания полифенольных соединений и флавоноидов в полуфабрикатах из растительного сырья и напитках из них осуществляли спектрофотометрическим методом с использованием реагентов Фолина-Чокальтеу и хлорида алюминия – измерение поглощения комплексов проводили при длинах волн 760 и 430 нм соответственно. [36].

Параметры цвета полуфабрикатов из растительного сырья и напитков устанавливали, центрифугируя при 8000 об/мин в течение 20 мин. Значения оптической плотности трижды измеряли с использованием фотометра планшетного Spark 10M (Tecan Group Ltd., Швейцария). Результаты выражали в виде цветовых координат L^* , a^* и b^* (система CIE). Координата L^* характеризует яркость цвета (100 и 0 – для белого и черного соответственно); хроматические координаты a^* и b^* представляют собой цветовое пространство между цветами: красным ($+a^*$) и зеленым ($-a^*$), желтым ($+b^*$) и синим ($-b^*$) [4]. Значение цветности (C^*) является мерой насыщенности (интенсивности) цвета продукции: более высокие значения указывают на яркий и интенсивный цвет, более низкие – на пастельные или бледные цвета [6]. Угол цветового тона (H°) характеризует оттенок (доминирующий тон) [1].

Все измерения выполняли на стандартном лабораторном оборудовании.

Органолептическую оценку полуфабрикатов из растительного сырья и напитков проводили согласно разработанной 5-балльной системе (табл. 1). Показатели оценивали последовательно, используя дробные балльные оценки до десятых долей включительно.

Для оценки значимости различий между средними значениями переменных использовали дисперсионный анализ с апостериорным тестом Тьюки. При этом оценивали влияние на формирование характеристик качества: сочетания вида растительного сырья и способа получения – на полуфабрикат (однофакторный анализ);

Таблица 1. Оценка органолептических показателей напитков

Table 1. Sensory properties

Показатель	Внешний вид	Запах, вкус и послевкусие	Общая оценка
Коэффициент весомости	0,4	0,6	–
Уровень качества, балл			
Отлично	4,20–5,00	4,40–5,00	выше 4,30
Хорошо	3,60–4,19	3,70–4,39	3,65–4,29
Удовлетворительно	2,70–3,59	2,70–3,69	2,70–3,64
Неудовлетворительно	ниже 2,70	ниже 2,70	ниже 2,70

трех факторов (наличие и количество полуфабриката из растительного сырья, наличие обогащающей добавки, характер подслащивающих веществ) – на готовые напитки (трехфакторный анализ); срока хранения – на стабильность характеристик качества напитков (однофакторный анализ). Величину эффекта оценивали по показателю η_p^2 (вклад фактора относительно ошибки). Взаимосвязи между исследуемыми показателями определяли с помощью коэффициента корреляции Пирсона. Для всех анализов принимали значимый уровень $p < 0,05$. Обработку данных проводили с использованием программного обеспечения Statistica 10.0.

Результаты и их обсуждение

Характеристики качества полуфабрикатов из растительного сырья. Для изготовления напитков использовали растительное сырье, содержащее соединения, обуславливающие формирование оригинальных органолептических характеристик продукции и усиление ее функциональной направленности (например антиоксидантной, противовоспалительной, антимикробной и др.): жареный молотый кофе – кофеин, хлорогеновая кислота, тригонеллин и др. [5]; листья мяты перечной (*Mentha piperita* L.) – эфирное масло, флавоноиды, фенилпропаноиды и др. [8]; трубочки корицы (*Cinnamomum zeylanicum* Blume) – коричный альдегид, коричный спирт, коричная кислота, циннамат и др. [14]; корни родиолы розовой (*Rhodiola rosea* L.) – флавоноиды, кумарины, антрахиноны и др. [12].

По внешнему виду полуфабрикаты из растительного сырья представляли собой прозрачную темную жидкость, однако отличались друг от друга по оттенкам и интенсивности окраски (рис. 1), что отразилось в оценках ($p < 0,05$), представленных на рисунке 2. В порядке убывания баллов за внешний вид образцы расположились следующим образом: CO_2 -экстракт корней родиолы розовой (1,91) > настой жареного молотого кофе (1,89) > настой трубочек корицы (1,86) > настой листьев мяты перечной (1,84). Наибольшие оценки за запах, вкус и послевкусие получили настой жареного молотого кофе (2,85 балла – горький, кофейный, терпкий, насыщенный, длительное послевкусие) и настой трубочек корицы (2,81 балла – сладкий, харак-



Рисунок 1. Внешний вид полуфабрикатов из растительного сырья: а – настой трубочек корицы; б – настой листьев мяты перечной; с – настой жареного молотого кофе; d – CO₂-экстракт корней родиолы розовой

Figure 1. Appearance of plant-based infusions and extracts: a – cinnamon; b – peppermint leaves; c – roasted ground coffee; and d – CO₂ extract of *Rhodiola rosea* roots

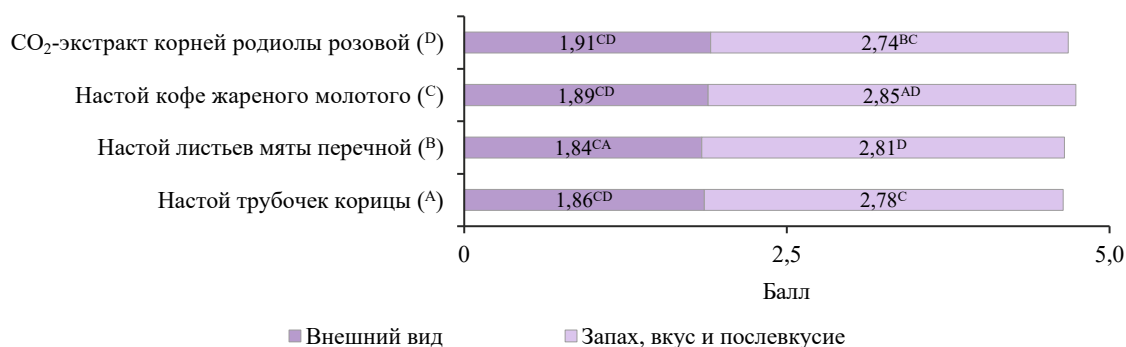


Рисунок 2. Оценка органолептических показателей полуфабрикатов из растительного сырья. Данные представлены в виде среднего значения $\pm$ SD. Прописные буквы в верхнем индексе указывают на то, что средние значения по показателю статистически различаются при $p < 0,05$

Figure 2. Sensory profiles of plant-based semi-finished products. Mean value $\pm$ SD. Capital letters in the superscript indicate that the average values for the indicator are statistically different at $p < 0.05$

Таблица 2. Физико-химические показатели полуфабрикатов из растительного сырья

Table 2. Physicochemical properties of plant-based semi-finished products

Показатель	Настой			CO ₂ -экстракт корней родиолы розовой (D)
	Трубочек корицы (A)	Листьев мяты перечной (B)	Жареного молотого кофе (C)	
Массовая доля сухих веществ, %	1,0 $\pm$ 0,1 ^{CD}	0,9 $\pm$ 0,1 ^{CD}	1,5 $\pm$ 0,1 ^{ABD}	10,6 $\pm$ 0,1 ^{A-C}
Кислотность, см ³ раствора гидроокиси натрия концентрацией 1,0 моль/дм ³ на 100 см ³	0,8 $\pm$ 0,1 ^{B-D}	0,5 $\pm$ 0,1 ^{ACD}	0,2 $\pm$ 0,1 ^{ABD}	1,7 $\pm$ 0,1 ^{A-C}

Примечание: данные представлены в виде среднего значения $\pm$ SD. Прописные буквы в верхнем индексе указывают на то, что средние значения по показателю статистически различаются при $p < 0,05$.

Note: Mean value $\pm$ SD. Capital letters in the superscript indicate that the average values for the indicator are statistically different at $p < 0.05$.

терный для корицы, терпкий, насыщенный, длительный). Им уступали настой листьев мяты перечной (2,78 балла – сладкий, характерный для мяты перечной, терпкий, насыщенный, длительный), CO₂-экстракт корней родиолы розовой (2,74 балла – горький, ассоциируемый с розами, терпкий, насыщенный, длительный послевкусие, с нотами этилового спирта).

Количество сухих веществ в полуфабрикатах из растительного сырья определяется содержащимися в них растворенными соединениями (углеводами, органическими кислотами и др.), которое необходимо учитывать при изготовлении пищевой продукции. Согласно данным таблицы 2, исследуемые полуфабрикаты по содержанию сухих веществ различались ($p < 0,05$): CO₂-

экстракт корней родиолы розовой (10,6 %) > жареного молотого кофе (1,5 %) > настой трубочек корицы (1,0 %) и настой листьев мяты перечной (0,9 %).

Общая кислотность продукции (титруемая), включающая свободные и связанные формы кислот, как и содержание спирта, является критерием ее вкусо-ароматических характеристик и стабильности. Кислотность CO₂-экстракта корней родиолы розовой в 2,1; 3,4 и 8,5 раза выше, чем у настоя трубочек корицы, листьев мяты перечной и жареного молотого кофе соответственно ($p < 0,05$). CO₂-экстракт корней родиолы розовой содержал спирт в количестве 70 %.

Физиологическую ценность полуфабрикатов из растительного сырья определяют содержащиеся в них

биологически активные соединения (табл. 3). Массовая концентрация витамина С в настоях трубочек корицы и листьев мяты перечной находилась на следовом уровне, в настое жареного молотого кофе не выявлялась, тогда как в CO_2 -экстракте корней родиолы розовой статистически значимо выше ($p < 0,05$). CO_2 -экстракт корней родиолы розовой содержал большее количество полифенольных соединений, чем настои трубочек корицы, жареного молотого кофе и листьев мяты перечной – в 1,4; 2,3 и 5,0 раза соответственно ($p < 0,05$), а флавоноидов – в 16,7; 4,4 и 7,5 раза ($p < 0,05$). Кофеин содержался только в настое жареного молотого кофе (18,06 мг/100 см³).

Цвет относится к основным показателям, формирующим потребительское восприятие. Значения координаты L^* (яркости цвета) полуфабрикатов из растительного сырья, представленные в таблице 4, свидетельствовали о том, что CO_2 -экстракт корней родиолы розовой темнее, чем настои жареного молотого кофе, листьев мяты перечной и трубочек корицы. По значениям координаты исследуемые полуфабрикаты при $p < 0,05$ расположились в порядке убывания: настоем трубочек корицы (83,04) > листьев мяты перечной (82,70) > настоем жареного молотого кофе (72,75) > CO_2 -экстракта корней родиолы розовой (67,12).

Положительные значения координаты a^* у настоя жареного молотого кофе (5,47) и CO_2 -экстракта корней родиолы розовой (12,11) указывали на преобладание красных компонент. В то же время значение a^* у настоя трубочек корицы (0,18) близко к нулю, что свидетельствует о нейтральности по красно-зеленой оси, а отрицательное значение у настоя листьев мяты перечной (–0,23) – о наличии зеленого компонента.

По значениям координаты b^* образцы расположились в порядке увеличения вклада желтой составляющей следующим образом: настоем трубочек корицы (14,47), настоем листьев мяты перечной (35,28), настоем жареного молотого кофе (50,15), CO_2 -экстракта корней родиолы розовой (68,64).

По цветовой насыщенности (C^*) полуфабрикаты из растительного сырья различались и убывали в следующем порядке: CO_2 -экстракт родиолы розовой (69,70) > настоем жареного молотого кофе (50,44) > настоем листьев мяты перечной (35,28) > настоем трубочек корицы (14,47).

Анализ угла цветового тона (H°) позволил определить доминирующий оттенок – все образцы показали значения в желто-оранжевой области спектра. Цвет CO_2 -экстракта корней родиолы розовой обладал наиболее выраженным оранжево-желтым оттенком ($H^\circ = 79,99^\circ$),

Таблица 3. Биологически активные соединения полуфабрикатов из растительного сырья, мг/100 см³

Table 3. Bioactive compounds of plant-based semi-finished products, mg/100 cm³

Массовая концентрация	Настой			CO_2 -экстракт корней родиолы розовой (^D)
	Трубочек корицы (^A)	Листьев мяты перечной (^B)	Жареного молотого кофе (^C)	
Витамин С	0,054 ± 0,005 ^D	0,259 ± 0,005 ^D	0 ^D	8,579 ± 0,298 ^{A-C}
Общее количество полифенольных соединений (по галловой кислоте)	1396,24 ± 197,52 ^{BCD}	386,51 ± 12,32 ^{ACD}	831,06 ± 4,90 ^{ABD}	1924,39 ± 66,88 ^{ABC}
Общее количество флавоноидов (по кверцетину)	23,81 ± 3,82 ^{BCD}	52,71 ± 2,48 ^{ACD}	90,84 ± 0,83 ^{ABD}	396,48 ± 5,70 ^{ABC}

Примечание: данные представлены в виде среднего значения ± SD. Прописные буквы в верхнем индексе указывают на то, что средние значения по показателю статистически различаются при $p < 0,05$.

Note: Mean value ± SD. Capital letters in the superscript indicate that the average values for the indicator are statistically different at $p < 0.05$.

Таблица 4. Цветовые компоненты полуфабрикатов из растительного сырья

Table 4. Color components of plant-based semi-finished products

Цветовые компоненты	Настой			CO_2 -экстракт корней родиолы розовой (^D)
	Трубочек корицы (^A)	Листьев мяты перечной (^B)	Жареного молотого кофе (^C)	
L^*	83,04 ± 0,60 ^{CD}	82,70 ± 0,09 ^{CD}	72,75 ± 0,05 ^{ABD}	67,12 ± 0,08 ^{ABC}
a^*	0,18 ± 0,01 ^{CD}	–0,23 ± 0,05 ^{CD}	5,47 ± 0,08 ^{ABD}	12,11 ± 0,36 ^{ABC}
b^*	14,47 ± 0,03 ^{BCD}	35,28 ± 0,33 ^{ACD}	50,15 ± 0,20 ^{ABD}	68,64 ± 0,74 ^{ABC}
C^*	14,47 ± 0,03 ^{BCD}	35,28 ± 0,33 ^{ACD}	50,44 ± 0,20 ^{ABD}	69,70 ± 0,79 ^{ABC}
H°	89,29 ± 0,03 ^{BCD}	90,38 ± 0,09 ^{ACD}	83,78 ± 0,06 ^{ABD}	79,99 ± 0,18 ^{ABC}

Примечание: данные представлены в виде среднего значения ± SD. Прописные буквы в верхнем индексе указывают на то, что средние значения по показателю статистически различаются при $p < 0,05$.

Note: Mean value ± SD. Capital letters in the superscript indicate that the average values for the indicator are statistically different at $p < 0.05$.

тогда как настои жареного молотого кофе ($H^{\circ} = 83,78$), трубочек корицы ($H^{\circ} = 89,29$) и листьев мяты перечной ($H^{\circ} = 90,38$) имели тон, близкий к чистому желтому. Несмотря на отрицательное значение a^* , тон настоя листьев мяты перечной также оказался в желтом секторе из-за высокого вклада желтой координаты (b^*).

Анализ корреляционных связей выявил ряд значимых зависимостей между органолептическими и физико-химическими показателями полуфабрикатов.

Оценка внешнего вида установила сильные положительные корреляции с содержанием сухих веществ ($r = 0,70$), флавоноидов ($r = 0,71$), а также с хроматическими координатами a^* ($r = 0,83$) и насыщенностью окраски C^* ($r = 0,70$). Наблюдалась высокая отрицательная связь с координатой L^* ($r = -0,85$) и с оттенком H° ($r = -0,87$). Связи с содержанием витамина С, полифенольных соединений и этилового спирта ($r = 0,66$) значимые, но меньшей силы.

Оценки за запах, вкус и послевкусие, напротив, имели значимые отрицательные корреляции с содержанием сухих веществ ($r = -0,60$), полифенольных соединений ($r = -0,60$), витамина С ($r = -0,62$), этилового спирта ($r = -0,62$) и кислотностью ($r = -0,72$). Единственной значимой положительной связью для этой группы характеристик было содержание кофеина ($r = 0,62$).

Физико-химические показатели тесно взаимосвязаны. Содержание сухих веществ имело высокие положительные корреляции с содержанием витамина С ($r = 0,99$), флавоноидов ($r = 0,99$) и этилового спирта ($r = 0,99$), а также тесную связь с полифенольными соединениями ($r = 0,78$). Аналогичный характер зависимостей наблюдался между витамином С, флавоноидами и этиловым спиртом ($r = 0,98-0,99$). Кислотность продукции положительно коррелировала с содержанием сухих веществ ($r = 0,90$), витамина С ($r = 0,91$), полифенольных соединений ($r = 0,84$), флавоноидов ($r = 0,85$) и этилового спирта ($r = 0,92$) и отрицательно – с кофеином ($r = -0,61$).

Анализ цветовых характеристик показал, что содержание сухих веществ, витамина С, флавоноидов и этилового спирта имело сильные отрицательные корреляции с яркостью L^* (r от $-0,78$ до $-0,87$) и сильные положительные связи с координатой a^* ($r = 0,88-0,94$). Связь показателей с координатой b^* и насыщенностью C^* также была положительной и сильной ($r = 0,77-0,87$). Содержание полифенольных соединений отрицательно коррелировало с яркостью ($r = -0,58$) и оттенком H° ($r = -0,66$) и положительно – с координатой a^* ($r = 0,69$).

Подтверждены сильные связи между цветовыми параметрами. Координата L^* имела сильные отрицательные корреляции с координатой a^* ($r = -0,98$), координатой b^* ($r = -0,93$), насыщенностью C^* ($r = -0,94$) и сильную положительную связь с оттенком H° ($r = 0,99$). Насыщенность цвета C^* сильно коррелировала с координатами b^* ($r = 0,99$) и a^* ($r = 0,91$). Координаты a^* и b^* также сильно связаны между собой ($r = 0,91$).

Установлено, что фактор изменчивости «сочетание вида растительного сырья и способа получения» оказывал статистически значимое влияние на все исследуемые характеристики качества полуфабрикатов ($\eta_p^2 \geq 54,7\%$, $p < 0,001$).

Полученные результаты исследований характеристик качества полуфабрикатов, в т. ч. содержания биологически активных соединений, параметров цвета, указывают на их зависимость от множества факторов, включая разновидность растительного сырья и способ его переработки. Это позволяет использовать их при изготовлении различных пищевых продуктов, что согласуется с данными других авторов [2, 3, 6, 7, 9, 15, 17, 20–23].

Состав и функциональные свойства напитков.

Состав напитков определен по результатам предварительных испытаний и представлен в таблице 5.

К функциональным отнесены варианты исследуемых напитков 7–12, т. к. они соответствовали установленным требованиям к функциональным напиткам за счет обогащения витамином С до уровня не менее 15 мг/100 см^3 (ГОСТ Р 56543-2015 «Напитки функциональные. Общие технические условия»). Употребление 200 см^3 напитка обеспечивает не менее 30 % от суточной потребности в витамине С (МР 2.3.1.0253-21 «Нормы физиологических потребностей в энергии и пищевых веществах для различных групп населения Российской Федерации»). При этом в соответствии с Приложением Б ГОСТ Р 55577-2013 «Продукты пищевые специализированные и функциональные. Информация об отличительных признаках и эффективности» витамин С связан с ожидаемыми благоприятными эффектами при систематическом потреблении.

В вариантах 2, 4, 6, 8, 10 и 12 сахар заменен на сукралозу (коэффициент сладости 600), что обеспечивает получение напитков со сниженным содержанием сахаров (менее $0,5 \text{ г/100 см}^3$) и пониженной энергетической ценностью (от $1,10$ до $2,61 \text{ ккал/100 см}^3$), что соответствует категории «безкалорийные» (ГОСТ Р 56543-2015 – не более 4 ккал/100 см^3) и позволяет корректно использовать отличительные признаки для продуктов со сниженным содержанием сахара(ов) согласно приложению А ГОСТ Р 55577-2013. Формулировки ожидаемого эффекта для замены сахара на подсластитель в приложении Б ГОСТ Р 55577-2013 приводятся в сравнительном виде – по отношению к пищевым продуктам, содержащим сахар. Таким образом, функциональные свойства напитков в рамках данной работы обоснованы преимущественно обогащением витамином С, тогда как замена сахара на сукралозу рассматривается как технологический прием, обеспечивающий снижение содержания сахаров и энергетической ценности, и возможность применения допустимых стандартом отличительных признаков.

При этом исследуемые напитки не могут быть классифицированы как тонизирующие (энергетические), т. к. содержание кофеина в них составляет в среднем

Таблица 5. Состав безалкогольных напитков (на 100 дал)

Table 5. Composition of soft drinks (per 100 daL)

Вариант напитка	Сырье								
	Сахар, кг	Сукралоза, кг	Настой жареного молотого кофе, дм ³	Настой листьев мяты перечной, дм ³	СО ₂ -экстракт корней родиолы розовой, дм ³	Настой трубочек корицы, дм ³	Колер, кг	Лимонная кислота, кг	Аскорбиновая кислота, кг
1	77,3	–	136,8	–	–	–	1,15	1,408	–
2	–	0,129	136,8	–	–	–	1,15	1,408	–
3	77,3	–	136,8	143,3	1,8	–	1,15	1,408	–
4	–	0,129	136,8	143,3	1,8	–	1,15	1,408	–
5	77,3	–	136,8	382,2	–	198,18	1,15	1,408	–
6	–	0,129	136,8	382,2	–	198,18	1,15	1,408	–
7	77,3	–	136,8	–	–	–	1,15	1,408	0,172
8	–	0,129	136,8	–	–	–	1,15	1,408	0,172
9	77,3	–	136,8	143,3	1,8	–	1,15	1,408	0,172
10	–	0,129	136,8	143,3	1,8	–	1,15	1,408	0,172
11	77,3	–	136,8	382,2	–	198,18	1,15	1,408	0,172
12	–	0,129	136,8	382,2	–	198,18	1,15	1,408	0,172

2,46 мг/100 см³, что ниже нормы на 15,1–40,0 мг/100 см³, установленной ГОСТ 34975-2023 «Напитки безалкогольные тонизирующие. Общие технические условия» и ТР ТС 021/2011 «Технический регламент Таможенного союза. О безопасности пищевой продукции». Количество СО₂-экстракта корней родиолы розовой (0,18 см³/100 см³) не превышает рекомендованную суточную дозу 0,2–0,6 см³ (10–30 капель) [10]. Также напитки не могут быть определены как холодный кофе, поскольку содержание кофе в них составляет в среднем 0,684 г/100 см³, что менее требуемого ГОСТ 34550-2019 «Кофе холодный. Технические условия» 1,0 г/100 см³.

Характеристики качества напитков, в т. ч. в процессе хранения. Содержание сухих веществ является одним из показателей качества напитков, т. к. характеризует количество растворимых соединений (сахаров, органических кислот и др.) в пищевой матрице. Общая кислотность – еще одна контролируемая составляющая качества, отражающая общее содержание веществ кислого характера (кислот, их кислых солей и др.).

На содержание сухих веществ в напитках при их формировании преобладающее влияние оказывал фактор «характер подслащающих веществ» ($\eta_p^2 = 100\%$, $p < 0,001$), существенный вклад вносили «наличие и количество полуфабриката из растительного сырья» ($\eta_p^2 = 89,7\%$, $p < 0,001$), «обогащающая добавка» ($\eta_p^2 = 26,5\%$, $p < 0,01$), а также взаимодействие факторов «характер подслащающих веществ» и «обогащающая добавка» ($\eta_p^2 = 16,2\%$, $p < 0,05$). Содержание сухих веществ в напитках ($p < 0,05$) зависело от вида подсластителя и сырья: 8,6 % – настой кофе жареного молотого, листьев мяты перечной и трубочек корицы, сахар; 8,2 % – настоем кофе жареного молотого, сахар, а также

настои кофе жареного молотого, листьев мяты перечной, СО₂-экстракт корней родиолы розовой, сахар; 0,9 % – настой кофе жареного молотого, листьев мяты перечной и трубочек корицы, сукралоза; 0,5 % – настоем кофе жареного молотого, сахар, а также настоем кофе жареного молотого, листьев мяты перечной, СО₂-экстракт корней родиолы розовой, сукралоза. Тот факт, что напитки, содержащие сахарозу, а не сукралозу, имели более высокое содержание сухих веществ, согласуется с данными исследований М. Al-Dabbas *et al.* [27]. Различия в содержании сухих веществ в зависимости от наличия и количества используемого растительного сырья и обогащающих добавок не противоречат результатам, полученным М. Shaik *et al.* [3] и G. Patel *et al.* [35].

Продолжительность хранения исследуемых напитков при температуре 4 ± 2 °С не оказывала значимого влияния на изменения содержания сухих веществ ($p > 0,05$), а наблюдаемые различия находились в пределах погрешности метода. В ряде работ для напитков иного состава и / или при других режимах хранения отмечены изменения содержания сухих веществ и приведены возможные причины таких изменений, в т. ч. гидролиз полисахаридов до более простых углеводов [3, 37]. В настоящей работе эти причины указаны как возможные, без утверждения их реализации в предложенных условиях хранения. Однако S. Maralanda *et al.* обнаружили, что содержание сухих веществ в процессе хранения напитка из сока сахарного тростника со вкусом ананаса и лайма уменьшается, особенно при отсутствии обогащающей его аскорбиновой кислоты [38].

Исследуемые факторы (наличие и количество полуфабриката из растительного сырья, характер подслащающих веществ, обогащающая добавка) не оказывали значимого влияния на значения общей кислотности

напитков ($p > 0,05$). Содержащаяся в продукции лимонная кислота (Е330) обуславливала значение титруемой кислотности на уровне $2,00 \text{ см}^3$ раствора гидроокиси натрия концентрацией $1,0 \text{ моль/дм}^3$ на 100 см^3 продукции и являлась определяющим фактором кислого вкуса, что согласуется с данными других авторов [16, 39]. При этом ряд исследователей отмечали, что общая кислотность продукции может зависеть также от вида используемого растительного сырья и технологии его изготовления [3], обогащающей добавки [35], но не от применения в составе сукралозы вместо сахарозы [27].

Титруемая кислотность по истечении 7 и 8 суток хранения напитков статистически значимо увеличивалась в среднем на 8,0 и 11,5 % соответственно ($\eta_p^2 = 88,5 \%$, $p < 0,001$). Учитывая режим хранения продукции при $4 \pm 2^\circ \text{C}$, увеличение кислотности может быть обусловлено комплексом медленно протекающих процессов: микробиологической активностью с накоплением органических кислот (что согласуется с увеличением количества мезофильных аэробных и факультативно-анаэробных микроорганизмов в процессе хранения), а также окислительно-восстановительными процессами с участием компонентов растительного сырья и аскорбиновой кислоты и возможными реакциями между компонентами рецептуры. Наблюдаемая направленность изменений соответствует данным других авторов [3, 37, 38], которые для интерпретации подобных изменений используют комплексный подход, включающий оценку состава органических кислот, редуцирующих сахаров, pH и др.

Учитывая, что в вариантах 1–6 витамин С не вносился и определялся на следовом уровне, обсуждение динамики и статистическую обработку данных по данному биологически активному соединению выполняли только для обогащенных напитков (варианты 7–12). Данные о содержании витамина С в этих образцах представлены в таблице 6. Такой подход соответствует исследованиям других авторов, подтверждающим целесообразность использования аскорбиновой кислоты при создании функциональных напитков, в т. ч.

на растительной основе [19]. В результате проведенного дисперсионного анализа показано, что на содержание в напитках витамина С значимое влияние оказывали факторы «характер подслащающих веществ» ($\eta_p^2 = 30,0 \%$, $p < 0,001$) и «продолжительность хранения» ($\eta_p^2 = 52,6 \%$, $p < 0,05$). По истечении 7 и 8 суток сохранность биологически активного соединения в напитках составила в среднем при использовании сахарозы – 98,6 и 96,9 %, сукралозы – 93,1 и 91,6 % соответственно. Результаты исследования деградации витамина С в напитках согласуются с данными других исследований [33, 40], в т. ч. о более значительных потерях при использовании сукралозы, а не сахарозы [29].

Содержание полифенольных соединений в напитках в наибольшей степени определялось наличием и количеством полуфабриката из растительного сырья ($\eta_p^2 = 99,5 \%$, $p < 0,001$). На количество флавоноидов также значимо, хотя и в меньшей степени, влиял характер подслащающих веществ ($\eta_p^2 = 24,0 \%$, $p < 0,05$).

Динамика содержания полифенольных соединений и флавоноидов в процессе хранения обусловлена преимущественно процессами окисления и полимеризации (табл. 7). Фактор «срок хранения» оказывал статистически значимое влияние на изменение содержания только флавоноидов ($\eta_p^2 = 7,0 \%$, $p < 0,05$). По истечении 7 суток хранения напитков наблюдался рост общего содержания полифенольных соединений от первоначального количества в среднем на 1,0 %, с последующим снижением к 8 суткам в среднем на 1,5 %. После 7 и 8 суток хранения напитков наблюдалось снижение количества флавоноидов в среднем на 8,4 и 10,0 % соответственно.

По массовой концентрации полифенольных соединений и флавоноидов при формировании и последующем хранении исследуемые напитки, в зависимости от наличия и количества полуфабриката из растительного сырья в рецептуре распределились следующим образом: наибольшее содержание отмечено для настоев жареного молотого кофе, листьев мяты перечной и трубочек корицы (в среднем $370,74$ и $27,17 \text{ мг/100 см}^3$ соответственно), затем следуют настои жареного

Таблица 6. Содержание витамина С в обогащенных напитках, мг/100 см^3

Table 6. Vitamin C in fortified beverage samples, mg/100 cm^3

Вариант напитка	Срок хранения, сутки		
	0 (a)	7 (b)	8 (c)
7 (e)	$17,112 \pm 0,077^c$	$16,825 \pm 0,173^{\text{HJL}}$	$16,507 \pm 0,156^{\text{HJLa}}$
8 (h)	$17,094 \pm 0,800^{bc}$	$15,905 \pm 0,105^{\text{GIKa}}$	$15,678 \pm 0,139^{\text{GIKa}}$
9 (i)	$17,110 \pm 0,052^c$	$16,881 \pm 0,205^{\text{HJL}}$	$16,583 \pm 0,065^{\text{HJLa}}$
10 (j)	$17,086 \pm 0,013^{bc}$	$15,894 \pm 0,116^{\text{GIKac}}$	$15,659 \pm 0,094^{\text{GIKab}}$
11 (k)	$17,110 \pm 0,058^c$	$16,900 \pm 0,257^{\text{HJL}}$	$16,636 \pm 0,099^{\text{HJLa}}$
12 (l)	$17,111 \pm 0,032^{bc}$	$15,952 \pm 0,019^{\text{GIKac}}$	$15,622 \pm 0,042^{\text{GIKab}}$

Примечание: данные представлены в виде среднего значения $\pm$ SD. Различные буквы в верхнем индексе указывают на статистически значимые различия ($p < 0,05$): прописные – между напитками, строчные – между сроками хранения.

Note: Mean value $\pm$ SD. Different letters in the upper index indicate statistically significant differences ($p < 0.05$): Uppercase – between drinks, lowercase – between shelf life.

Таблица 7. Содержание полифенольных соединений в напитках, мг/100 см³Table 7. Polyphenolic compounds in functional beverages, mg/100 cm³

Вариант напитка	Срок хранения, сутки		
	0 (a)	7 (b)	8 (c)
Массовая концентрация общего количества полифенольных соединений (по галловой кислоте)			
1 (A)	149,14 ± 3,78 ^{C-FI-Lc}	140,56 ± 3,56 ^{C-FI-L}	139,00 ± 3,52 ^{C-FI-La}
2 (B)	146,55 ± 3,34 ^{C-FI-Lc}	139,07 ± 3,17 ^{C-FI-L}	138,20 ± 3,15 ^{C-FI-La}
3 (C)	325,33 ± 6,05 ^{ABE-HKLbc}	306,79 ± 5,70 ^{ABE-IKLa}	303,54 ± 5,64 ^{ABE-IKLa}
4 (D)	321,61 ± 4,98 ^{ABE-HKLbc}	305,21 ± 4,72 ^{ABE-La}	303,37 ± 4,69 ^{ABE-IKLa}
5 (E)	372,31 ± 12,95 ^{A-DG-J}	350,72 ± 12,20 ^{A-DGHJK}	346,92 ± 12,07 ^{A-DGHK}
6 (F)	371,06 ± 13,61 ^{A-DG-J}	352,10 ± 12,91 ^{A-DGHJKL}	349,95 ± 12,83 ^{A-DGHK}
7 (G)	148,78 ± 4,68 ^{C-FI-Lb}	164,41 ± 5,17 ^{C-FI-La}	156,67 ± 4,93 ^{C-FI-L}
8 (H)	147,92 ± 3,69 ^{C-FI-L}	154,24 ± 3,84 ^{C-FI-L}	149,73 ± 3,73 ^{C-FI-L}
9 (I)	323,88 ± 3,98 ^{ABE-HKLbc}	357,86 ± 4,39 ^{A-DGHKac}	341,15 ± 4,19 ^{A-DGHKLab}
10 (J)	320,90 ± 6,43 ^{ABE-HKL}	334,70 ± 6,71 ^{A-DGHKL}	325,27 ± 6,71 ^{ABGHKL}
11 (K)	374,94 ± 12,56 ^{A-DG-Jb}	414,27 ± 13,88 ^{A-JLa}	394,70 ± 13,22 ^{A-J}
12 (L)	367,25 ± 14,55 ^{A-DG-J}	382,75 ± 15,17 ^{A-HJK}	371,88 ± 14,74 ^{A-DG-J}
Массовая концентрация общего количества флавоноидов (по кверцетину)			
1 (A)	19,65 ± 0,20 ^{C-FI-Lbc}	17,94 ± 0,19 ^{C-FI-La}	17,47 ± 0,18 ^{C-FI-La}
2 (B)	19,59 ± 0,19 ^{C-FI-Lbc}	18,01 ± 0,18 ^{C-FI-La}	17,73 ± 0,18 ^{C-FI-La}
3 (C)	22,03 ± 0,29 ^{ABE-HKLbc}	20,11 ± 0,27 ^{ABE-HKLa}	19,58 ± 0,26 ^{ABE-HKLa}
4 (D)	21,89 ± 0,36 ^{ABE-HKLbc}	20,13 ± 0,33 ^{ABE-HKLa}	19,81 ± 0,33 ^{ABE-HKLa}
5 (E)	29,54 ± 0,88 ^{A-DG-Jbc}	26,97 ± 0,81 ^{A-DG-Ja}	26,25 ± 0,79 ^{A-DG-Ja}
6 (F)	28,36 ± 0,48 ^{A-DG-Jbc}	26,07 ± 0,44 ^{A-DG-Ja}	25,66 ± 0,43 ^{A-DG-Ja}
7 (G)	19,74 ± 0,15 ^{C-FI-Lbc}	18,08 ± 0,14 ^{C-FI-Lac}	17,72 ± 0,13 ^{C-FI-Lab}
8 (H)	19,56 ± 0,15 ^{C-FI-Lbc}	17,96 ± 0,14 ^{C-FI-La}	17,76 ± 0,13 ^{C-FI-La}
9 (I)	22,23 ± 0,43 ^{ABE-HKLbc}	20,36 ± 0,40 ^{ABE-HKLa}	19,96 ± 0,39 ^{ABE-HKLa}
10 (J)	21,81 ± 0,38 ^{ABE-HKLbc}	19,96 ± 0,35 ^{ABE-HKLa}	19,81 ± 0,35 ^{ABE-HKLa}
11 (K)	29,27 ± 0,88 ^{A-DG-Jbc}	26,81 ± 0,81 ^{A-DG-Ja}	26,28 ± 0,79 ^{A-DG-Ja}
12 (L)	28,62 ± 0,48 ^{A-DG-Jbc}	26,28 ± 0,44 ^{A-DG-Ja}	25,99 ± 0,44 ^{A-DG-Ja}

Примечание: данные представлены в виде среднего значения ± SD. Различные буквы в верхнем индексе указывают на статистически значимые различия ($p < 0,05$): прописные – между напитками, строчные – между сроками хранения.

Note: Mean value ± SD. Different letters in the upper index indicate statistically significant differences ($p < 0.05$): Uppercase – between drinks, lowercase – between shelf life.

молотого кофе, листьев мяты перечной и CO₂-экстракта корней родиолы розовой (в среднем 322,47 и 20,64 мг/100 см³), а наименьшие – для настоя жареного молотого кофе (в среднем 147,86 и 18,43 мг/100 см³). Полученные данные о стабильности полифенольных соединений в напитках в зависимости от наличия и количества используемого растительного сырья согласуются с исследованиями других авторов [41]

Анализ влияния подсластителя показал, что потери общих полифенольных соединений к 7 и 8 суткам хранения в напитках без обогащающей добавки ниже в образцах с сукралозой (варианты 2, 4, 6, средние потери 5,1 и 5,7 % соответственно), чем в образцах с сахарозой (варианты 1, 3, 5, средние потери 5,8 и 6,7 % соответственно). Введение в рецептуру аскорбиновой кислоты существенно повлияло на динамику полифенольных соединений: к 7 суткам хранения в обогащенных напитках на сахарозе (варианты 7, 9, 11) наблюдалось увеличение их концентрации в среднем на 10,5 % с последующим снижением на 5,2 % к 8 суткам. Аналогичная тенденция отмечена для напитков

с сукралозой (варианты 8, 10, 12): увеличение на 4,3 % к 7 суткам и сохранение прироста на 1,3 % к 8 суткам относительно исходного уровня.

Содержание флавоноидов в процессе хранения также в большей степени снижалось в вариантах с сахарозой (средние потери 8,6 и 10,7 % к 7 и 8 суткам соответственно), чем с сукралозой (8,2 и 9,4 %).

Результаты, свидетельствующие о большей стабильности полифенольных соединений при использовании сукралозы по сравнению с сахарозой, согласуются с данными работы A. Dyab *et al.* [25]. Наблюдаемый протекторный эффект аскорбиновой кислоты в отношении сохранности полифенольных соединений подтверждается результатами других исследований, например J. Oszmiański *et al.* [34].

Для усиления окраски напитков использовали сульфитно-аммиачный сахарный колер (E150d), широко применяемый при изготовлении напитков, в т. ч. содержащих ингредиенты из растительного сырья, с целью стандартизации цвета [42]. В связи с этим провели исследования влияния наличия и количества полу-

фабриката из растительного сырья, характера подслащающих веществ и присутствия обогащающей добавки на цветовые координаты напитков.

Фактор «наличие и количество полуфабриката из растительного сырья» значимо влиял на координату L^* , хроматические координаты (a^* , b^*), интенсивность цвета (C^*) и цветовой тон (H°) напитков ($\eta_p^2 = 98,0\text{--}99,6\%$, $p < 0,001$). Фактор «характер подслащающих веществ» влиял на координату L^* , цветовой тон, а также на присутствие красных и зеленых компонент ($\eta_p^2 = 41,9\text{--}56,2\%$, $p < 0,001$), при этом для координат b^* и C^* его влияние статистически незначимо ($p > 0,05$).

Наличие обогащающей добавки, а также взаимодействие таких факторов, как «характер подслащающих веществ» и «наличие обогащающей добавки» оказывали влияние на присутствие в продукции желтых или синих компонент и интенсивность ее цвета ($\eta_p^2 = 17,4\text{--}20,2\%$, $p < 0,05$).

Согласно данным таблицы 8, значения координаты L^* значимо различались ($p < 0,001$). Наиболее светлыми были напитки, при изготовлении которых использовали только настой жареного молотого кофе, а наиболее темными – настои жареного молотого кофе, листьев мяты перечной и трубочек корицы. Данная

Таблица 8. Цветовые координаты напитков

Table 8. Color coordinates in functional beverages

Вариант напитка	Срок хранения, сутки		
	0 (a)	7 (b)	8 (c)
L^*			
1 (A)	$85,70 \pm 0,25^{C\text{-FI-Lbc}}$	$83,65 \pm 0,24^{B\text{-FI-Lac}}$	$81,34 \pm 0,24^{C\text{-FI-Lab}}$
2 (B)	$85,64 \pm 0,25^{C\text{-FI-Lbc}}$	$82,67 \pm 0,24^{AC\text{-HKLac}}$	$81,31 \pm 0,24^{C\text{-FI-Lab}}$
3 (C)	$83,68 \pm 0,28^{ABE\text{-HKLbc}}$	$81,81 \pm 0,27^{ABD\text{-HKLac}}$	$79,44 \pm 0,27^{ABE\text{-HKLab}}$
4 (D)	$83,17 \pm 0,12^{ABE\text{-HKLbc}}$	$80,22 \pm 0,12^{A\text{-CE-Lac}}$	$78,99 \pm 0,12^{ABE\text{-HKLab}}$
5 (E)	$78,22 \pm 0,36^{A\text{-DG-Jbc}}$	$76,29 \pm 0,35^{A\text{-DF-Jac}}$	$74,15 \pm 0,27^{A\text{-DG-Jab}}$
6 (F)	$77,68 \pm 0,20^{A\text{-DG-Jbc}}$	$74,90 \pm 0,19^{A\text{-EG-Lac}}$	$73,73 \pm 0,19^{A\text{-DG-Jab}}$
7 (G)	$85,81 \pm 0,23^{C\text{-FI-Lbc}}$	$84,30 \pm 0,23^{B\text{-FI-Lac}}$	$81,46 \pm 0,23^{C\text{-FI-Lab}}$
8 (H)	$85,68 \pm 0,30^{C\text{-FI-Lbc}}$	$83,84 \pm 0,25^{B\text{-FI-Lac}}$	$81,36 \pm 0,29^{C\text{-FI-Lab}}$
9 (I)	$83,81 \pm 0,21^{ABE\text{-HKLbc}}$	$82,36 \pm 0,20^{AD\text{-HKLac}}$	$79,59 \pm 0,20^{ABE\text{-HKLab}}$
10 (J)	$83,19 \pm 0,07^{ABE\text{-HKLbc}}$	$81,95 \pm 0,10^{AD\text{-HKLac}}$	$79,01 \pm 0,14^{ABE\text{-HKLab}}$
11 (K)	$78,29 \pm 0,36^{A\text{-DG-Jbc}}$	$76,76 \pm 0,61^{A\text{-DF-Jac}}$	$74,30 \pm 0,34^{A\text{-DG-Jab}}$
12 (L)	$78,10 \pm 0,18^{A\text{-DG-Jbc}}$	$76,47 \pm 0,18^{A\text{-DF-Jac}}$	$73,99 \pm 0,18^{A\text{-DG-Jab}}$
a^*			
1 (A)	$-0,84 \pm 0,06^{D\text{-FJ-Lc}}$	$-0,92 \pm 0,06^{D\text{-FI-L}}$	$-1,02 \pm 0,06^{D\text{-FJ-La}}$
2 (B)	$-0,74 \pm 0,02^{D\text{-FJ-Lbc}}$	$-0,86 \pm 0,02^{D\text{-FJ-Lac}}$	$-0,92 \pm 0,02^{EFJ\text{-Lab}}$
3 (C)	$-0,67 \pm 0,03^{EFKLbc}$	$-0,72 \pm 0,00^{EFHKLac}$	$-0,84 \pm 0,02^{EFGKLab}$
4 (D)	$-0,47 \pm 0,11^{ABE\text{-HKLc}}$	$-0,61 \pm 0,11^{ABE\text{-HKL}}$	$-0,74 \pm 0,01^{AE\text{-HKL a}}$
5 (E)	$-0,24 \pm 0,04^{A\text{-DG-Jbc}}$	$0,11 \pm 0,04^{A\text{-DG-Ja}}$	$0,07 \pm 0,00^{A\text{-DG-Ja}}$
6 (F)	$-0,44 \pm 0,03^{A\text{-DG-Jbc}}$	$0,29 \pm 0,05^{A\text{-DG-Ja}}$	$0,21 \pm 0,05^{A\text{-DG-Ja}}$
7 (G)	$-0,84 \pm 0,19^{D\text{-FJ-L}}$	$-0,91 \pm 0,19^{D\text{-FI-L}}$	$-1,02 \pm 0,18^{C\text{-FI-L}}$
8 (H)	$-0,81 \pm 0,07^{D\text{-FJ-Lc}}$	$-0,95 \pm 0,07^{C\text{-FI-L}}$	$-0,99 \pm 0,07^{D\text{-FJ-La}}$
9 (I)	$-0,64 \pm 0,02^{EFKLc}$	$-0,69 \pm 0,01^{AE\text{-HKLc}}$	$-0,84 \pm 0,02^{E\text{-GKL a}}$
10 (J)	$-0,46 \pm 0,05^{ABE\text{-HKLbc}}$	$-0,59 \pm 0,01^{ABE\text{-HKLac}}$	$-0,73 \pm 0,01^{ABE\text{-HKL a}}$
11 (K)	$0,23 \pm 0,09^{A\text{-DG-J}}$	$0,18 \pm 0,01^{A\text{-DG-JL}}$	$0,13 \pm 0,01^{A\text{-DG-J}}$
12 (L)	$0,38 \pm 0,01^{A\text{-DG-Jbc}}$	$0,29 \pm 0,01^{A\text{-DG-Jac}}$	$0,24 \pm 0,03^{A\text{-DG-J}}$
b^*			
1 (A)	$24,40 \pm 0,26^{C\text{-FI-Lc}}$	$23,81 \pm 0,25^{C\text{-FI-Lc}}$	$23,14 \pm 0,25^{C\text{-FI-Lab}}$
2 (B)	$24,43 \pm 0,47^{C\text{-FI-Lc}}$	$23,57 \pm 0,46^{C\text{-FI-L}}$	$23,17 \pm 0,45^{C\text{-FI-La}}$
3 (C)	$26,32 \pm 0,12^{ABE\text{-HKLbc}}$	$25,71 \pm 0,10^{ABE\text{-HKLac}}$	$24,97 \pm 0,10^{ABE\text{-HKLab}}$
4 (D)	$27,17 \pm 0,26^{ABE\text{-HJ-Lbc}}$	$26,21 \pm 0,25^{ABE\text{-HKL a}}$	$25,82 \pm 0,27^{ABE\text{-HKL a}}$
5 (E)	$33,88 \pm 0,42^{A\text{-DG-J}}$	$33,06 \pm 0,41^{A\text{-DG-J}}$	$32,92 \pm 0,38^{A\text{-DG-J}}$
6 (F)	$34,22 \pm 0,17^{A\text{-DG-Jbc}}$	$33,01 \pm 0,15^{A\text{-DG-Jac}}$	$32,50 \pm 0,15^{A\text{-DG-Jab}}$
7 (G)	$24,34 \pm 0,14^{C\text{-FI-Lbc}}$	$23,90 \pm 0,14^{C\text{-FI-Lac}}$	$23,08 \pm 0,13^{C\text{-FI-Lab}}$
8 (H)	$24,58 \pm 0,38^{C\text{-FI-Lbc}}$	$23,74 \pm 0,03^{B\text{-FI-La}}$	$23,32 \pm 0,36^{C\text{-FI-La}}$
9 (I)	$26,40 \pm 0,07^{ABE\text{-HKLbc}}$	$25,93 \pm 0,06^{ABE\text{-HKLac}}$	$25,06 \pm 0,06^{ABE\text{-HKLab}}$
10 (J)	$26,29 \pm 0,21^{ABD\text{-HKLc}}$	$25,73 \pm 0,22^{ABE\text{-HKL}}$	$25,04 \pm 0,46^{ABE\text{-HKL a}}$
11 (K)	$33,93 \pm 0,44^{A\text{-DG-Jc}}$	$33,11 \pm 0,01^{A\text{-DG-JLc}}$	$32,18 \pm 0,44^{A\text{-DG-Jab}}$
12 (L)	$33,45 \pm 0,51^{A\text{-DG-Jc}}$	$32,33 \pm 0,50^{A\text{-DG-J}}$	$32,16 \pm 0,39^{A\text{-DG-Ja}}$

Продолжение таблицы 8

Вариант напитка	Срок хранения, сутки		
	0 (a)	7 (b)	8 (c)
<i>C*</i>			
1 (A)	24,41 ± 0,26 ^{C-FI-Lc}	23,82 ± 0,25 ^{C-FI-Lc}	23,16 ± 0,25 ^{C-FI-Lab}
2 (B)	24,44 ± 0,47 ^{C-FI-Lc}	23,58 ± 0,45 ^{C-FH-L}	23,19 ± 0,45 ^{C-FI-La}
3 (C)	26,33 ± 0,12 ^{ABE-HKLbc}	25,72 ± 0,10 ^{ABE-HKLac}	24,98 ± 0,10 ^{ABE-HKLab}
4 (D)	27,18 ± 0,26 ^{ABE-HJ-Lbc}	26,22 ± 0,25 ^{ABE-HKLac}	25,83 ± 0,27 ^{ABE-HKLac}
5 (E)	33,88 ± 0,42 ^{A-DG-J}	33,06 ± 0,41 ^{A-DG-J}	32,92 ± 0,38 ^{A-DG-JL}
6 (F)	34,22 ± 0,17 ^{A-DG-Jbc}	33,01 ± 0,15 ^{A-DG-Jac}	32,51 ± 0,15 ^{A-DG-JLab}
7 (G)	24,35 ± 0,13 ^{C-FI-Lbc}	23,92 ± 0,13 ^{C-FI-Lac}	23,10 ± 0,12 ^{C-FI-Lab}
8 (H)	24,59 ± 0,38 ^{C-FI-Lbc}	23,76 ± 0,03 ^{B-FI-La}	23,34 ± 0,36 ^{C-FI-La}
9 (I)	26,41 ± 0,07 ^{ABE-HKLbc}	25,94 ± 0,06 ^{ABE-HKLac}	25,07 ± 0,06 ^{ABE-HKLab}
10 (J)	26,29 ± 0,21 ^{ABD-HKLc}	25,74 ± 0,22 ^{ABE-HKL}	25,05 ± 0,46 ^{ABE-HKLac}
11 (K)	33,93 ± 0,44 ^{A-DG-Jc}	33,11 ± 0,01 ^{A-DG-Jc}	32,18 ± 0,44 ^{A-DG-Jab}
12 (L)	33,45 ± 0,51 ^{A-DG-Jc}	32,33 ± 0,50 ^{A-DG-J}	32,16 ± 0,40 ^{A-DG-Ja}
<i>H°</i>			
1 (A)	91,96 ± 0,04 ^{D-FI-Lc}	92,21 ± 0,04 ^{C-FI-L}	92,52 ± 0,04 ^{C-FI-La}
2 (B)	91,73 ± 0,09 ^{D-FI-Lbc}	92,09 ± 0,09 ^{D-FI-La}	92,27 ± 0,09 ^{D-FI-La}
3 (C)	91,45 ± 0,06 ^{E-GKLbc}	91,60 ± 0,02 ^{AE-HKLac}	91,93 ± 0,04 ^{AE-HKLac}
4 (D)	90,99 ± 0,04 ^{ABE-HKLc}	91,33 ± 0,05 ^{AE-HKL}	91,64 ± 0,04 ^{ABE-HKLac}
5 (E)	89,60 ± 0,07 ^{A-DI-Lbc}	89,80 ± 0,07 ^{A-DG-Ja}	89,88 ± 0,01 ^{A-DG-Ja}
6 (F)	89,26 ± 0,05 ^{A-DG-Jbc}	89,50 ± 0,08 ^{A-DG-Ja}	89,63 ± 0,08 ^{A-DG-Ja}
7 (G)	91,99 ± 0,07 ^{A-DG-J}	92,18 ± 0,07 ^{C-FI-L}	92,54 ± 0,07 ^{C-FI-L}
8 (H)	91,88 ± 0,07 ^{D-FI-Lc}	92,29 ± 0,06 ^{C-FI-L}	92,43 ± 0,08 ^{C-FI-La}
9 (I)	91,39 ± 0,05 ^{AE-GKLbc}	91,53 ± 0,02 ^{ABE-HKLac}	91,91 ± 0,05 ^{AE-HKLac}
10 (J)	91,01 ± 0,09 ^{ABE-HKLbc}	91,30 ± 0,01 ^{AE-HKLac}	91,66 ± 0,04 ^{ABE-HKLac}
11 (K)	89,61 ± 0,05 ^{A-DG-J}	89,70 ± 0,01 ^{A-DG-J}	89,77 ± 0,02 ^{A-DG-J}
12 (L)	89,35 ± 0,03 ^{A-DG-Jbc}	89,49 ± 0,01 ^{A-DG-Jac}	89,57 ± 0,05 ^{A-DG-Jab}

Примечание: данные представлены в виде среднего значения ± SD. Различные буквы в верхнем индексе указывают на статистически значимые различия ($p < 0,05$): прописные – между напитками, строчные – между сроками хранения.

Note: Mean value ± SD. Different letters in the upper index indicate statistically significant differences ($p < 0,05$): Uppercase – between drinks, lowercase – between shelf life.

тенденция наблюдалась вне зависимости от наличия обогащающих добавок. Кроме того, напитки, при изготовлении которых использовали сахар, в среднем на 0,4 % светлее, чем напитки на сукралозе ($p < 0,001$).

По хроматической координате a^* и углу цветового тона H° установлено, что для напитков с настоем трубочек корицы характерна положительная координата a^* (наличие красной составляющей) и меньшие значения H° (89,3–89,6°), что соответствует оранжево-желтому оттенку ($p < 0,001$). Напитки на основе настоев жареного молотого кофе, листьев мяты перечной и CO_2 -экстракта корней родиолы розовой, обладали меньшей выраженностью зеленого компонента (a^* ближе к 0) и оттенком, более близким к чисто-желтому (H° ниже), по сравнению с напитками, содержащими только настой жареного молотого кофе ($p < 0,001$). Влияние характера подслащивающих веществ также значимо: в вариантах 5 и 11 (с сахаром) значение a^* в среднем на 42,7 % ниже, а угол H° примерно на 0,3° выше (оттенок немного ближе к желтому), чем в вариантах 6 и 12 (с сукралозой) ($p < 0,001$). Аналогично в вариантах 1, 3, 7, 9 напитков (с сахаром) зеленый компонент

(по модулю отрицательной a^*) на 20,6 % выше, а угол H° примерно на 0,3° выше (смещение в сторону зелено-желтого тона), чем в вариантах 2, 4, 8, 10 (с сукралозой) ($p < 0,001$).

Анализ хроматической координаты b^* и интенсивности цвета C^* показал, что по преобладанию желтых компонентов и яркости цвета напитки расположились в порядке убывания: напитки с настоями жареного молотого кофе, листьев перечной мяты и трубочек корицы > напитки с настоями жареного молотого кофе, листьев мяты перечной и CO_2 -экстрактом корней родиолы розовой > напитки только с настоем жареного молотого кофе ($p < 0,001$). Кроме того, в продукции, необогащенной аскорбиновой кислотой, доля желтых компонентов и яркость цвета на 0,8 % выше, чем в обогащенной ($p < 0,001$).

Продолжительность хранения оказала статистически значимое влияние на изменение яркости напитков ($\eta_p^2 = 22,3 \%$, $p < 0,001$), но не других цветовых характеристик ($p > 0,05$). Анализ данных показал, что в процессе хранения на 7 и 8 сутки напитки темнели в среднем на 2,4 и 5,1 % соответственно, что

отражало снижение координаты L^* . Значение цветовой координаты C^* имело тенденцию к снижению: по истечении 7 и 8 суток в среднем на 2,7 и 4,7 % соответственно, что свидетельствует об уменьшении интенсивности окраски продукции. Динамика изменения красной или зеленой компоненты (a^*) зависела от рецептуры. У вариантов 1–4 и 7–10 содержание зеленых пигментов увеличивалось в среднем на 14,3 и 29,8 % на 7 и 8 сутки. Напротив, у вариантов 5, 6, 11, 12 содержание красных пигментов снижалось в среднем на 32,6 и 50,0 %. Это также приводило к смещению оттенка (H°): у напитков 1–4 и 7–10 угол H° увеличивался (на 0,3 и 0,6 %), что соответствует сдвигу в сторону более зелено-желтого тона, у вариантов напитка с корицей (5, 6, 11, 12) рост H° (на 0,2 и 0,3 %) означает ослабление красной составляющей и сдвиг оттенка в сторону желтого (а не в сторону оранжевого). По координате b^* (желто-синия) отмечена тенденция к уменьшению преобладания желтых пигментов над синими в среднем на 2,7 и 4,8 % на 7 и 8 сутки.

Результаты исследования согласуются с данными других авторов о том, что растительное сырье является основным фактором, определяющим исходный цвет напитков, благодаря вносимым природным пигментам [28, 31, 32]. Изменения цветовых координат напитков

во время хранения являются прямым следствием процесса окисления полифенольных соединений и других чувствительных компонентов растительного сырья [28, 31, 32]. Сахароза способна оказывать стабилизирующее действие на некоторые пигменты (например антоцианы) при формировании цвета продукции, что приводит к различиям в цветовых координатах по сравнению с сукралозой, которая такого эффекта не имеет [28]. Однако сукралоза как нередуцирующий сахар предпочтительнее для сохранения стабильности цвета напитков при хранении [28]. Основная функция аскорбиновой кислоты проявляется не в формировании исходного цвета напитков, а в ингибировании окислительных и ферментативных процессов, которые приводят к дестабилизации цвета во время хранения [28, 31, 32].

На содержание микроорганизмов в напитках статистически значимое влияние оказывали факторы «характер подслащивающих веществ» и «наличие и количество полуфабриката из растительного сырья» ($\eta_p^2 = 42,3$ и $26,5$ % соответственно, $p < 0,05$). При этом исследуемые напитки на момент изготовления значимо не различались между собой по содержанию мезофильных аэробных и факультативно-анаэробных микроорганизмов (рис. 3, $p > 0,05$).

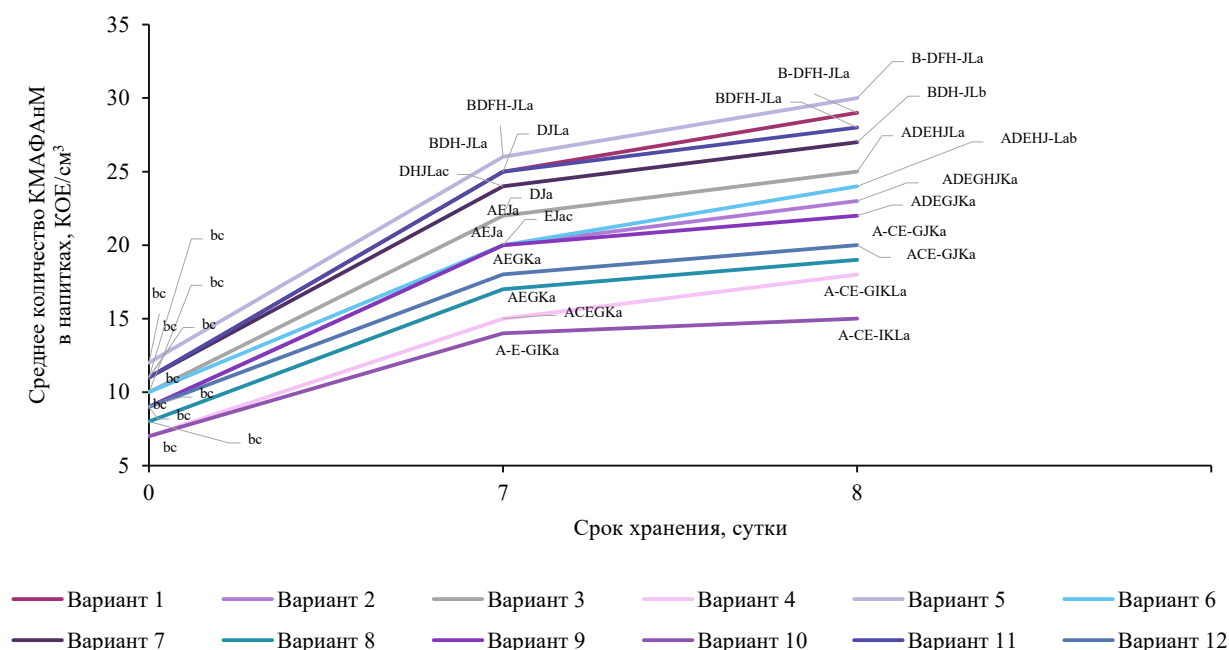


Рисунок 3. Среднее количество колоний мезофильных аэробных и факультативно-анаэробных микроорганизмов (КМАФАнМ) в напитках (буквы в верхнем индексе указывают на то, что средние значения статистически различаются при $p < 0,05$. Срок хранения: a – 0 суток; b – 7 суток; c – 8 суток. Вариант напитка: A – вариант 1; B – вариант 2; C – вариант 3; D – вариант 4; E – вариант 5; F – вариант 6; G – вариант 7; H – вариант 8; I – вариант 9; J – вариант 10; K – вариант 11; L – вариант 12)

Figure 3. Mesophilic aerobic and optionally anaerobic microorganisms in functional beverages (the letters in the superscript indicate that the average values in the row are statistically different at $p < 0.05$. Shelf life: a – 0 days; b – 7 days; c – 8 days. Drink option: A – option 1; B – option 2; C – option 3; D – option 4; E – option 5; F – option 6; G – option 7; H – option 8; I – option 9; J – option 10; K – option 11; and L – option 12)

Количество мезофильных аэробных и факультативно-анаэробных микроорганизмов достоверно увеличивалось в процессе хранения ($\eta_p^2 = 72,4 \%$, $p < 0,001$). После 7 и 8 суток хранения их содержание возросло в среднем 2,2 и 2,4 раза соответственно. Динамика роста микроорганизмов зависела от состава напитка: у продукции, содержащей настой жареного молотого кофе, – в 2,2 и 2,5 раза; у продукции с настоями молотого жареного кофе, листьев мяты перечной и трубочек корицы – в 2,2 и 2,4 раза; у продукции с настоями жареного молотого кофе, листьев мяты перечной и CO_2 -экстрактом корней родиолы розовой – в 2,1 и 2,4 раза. Напитки на сахарозе показали увеличение в 2,2 и 2,5 раза, на сукралозе – в 2,1 и 2,4 раза. В вариантах без обогащающей добавки рост микроорганизмов составил в 2,2 и 2,5 раза, с аскорбиновой кислотой – в 2,1 и 2,4 раза.

По истечении 8 суток хранения содержание исследуемых микроорганизмов составляло 15–30 КОЕ/см³ (включительно) и не превышало норму, установленную ТР ТС 021/2011 (не более 30 КОЕ/см³). Наибольшее количество мезофильных аэробных и факультативно-анаэробных микроорганизмов на 8 сутки отмечено для варианта 5 – 30 КОЕ/см³. Патогенные микро-

организмы, в т. ч. рода *Salmonella*, бактерии группы кишечной палочки, плесневые грибы и дрожжи, в исследуемых образцах напитков отсутствовали как на момент изготовления, так и на протяжении всего периода.

Полученные результаты о содержании мезофильных аэробных и факультативно-анаэробных микроорганизмов в напитках, в т. ч. об их изменениях, согласуются с данными других авторов, которые отмечают влияние не только входящего в состав растительного сырья [18, 24, 43], но и ингибирующее действие сукралозы, по сравнению с сахарозой [37], обогащающей продукцию аскорбиновой кислоты [38].

По внешнему виду исследуемые варианты напитков представляли собой прозрачную жидкость коричневого цвета (рис. 4), обладающую ароматом жареного кофе. Варианты 3, 4, 9 и 10 имели ноты мяты перечной и родиолы розовой, варианты 5, 6, 11 и 12 – ноты мяты перечной и корицы. Вкус и послевкусие у всех вариантов были насыщенными кофейными, сладко-кислыми, горькими, терпкими, с длительным послевкусием, причем у вариантов 3, 4, 9 и 10 дополнительно проявлялись ноты мяты перечной и родиолы розовой, а у вариантов 5, 6, 11 и 12 – ноты мяты перечной и корицы.

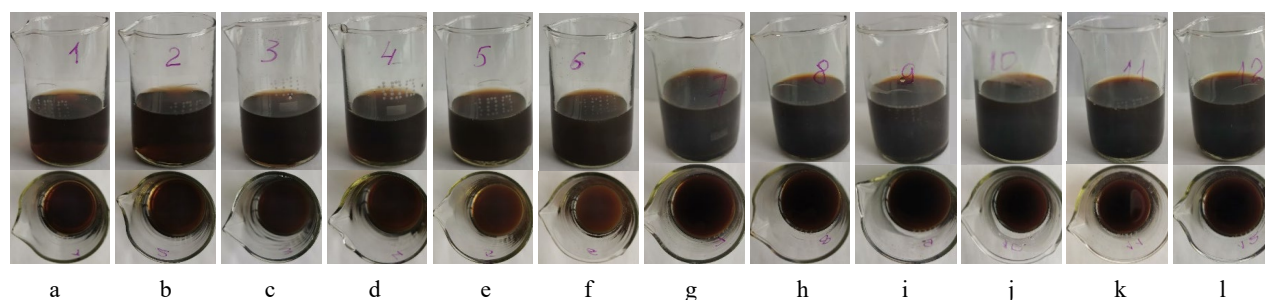


Рисунок 4. Внешний вид напитков: а – настой молотого жареного кофе, с сахаром, без обогащающей добавки; б – настой молотого жареного кофе, с сукралозой, без обогащающей добавки; в – настои жареного молотого кофе и листьев мяты перечной, CO_2 -экстракт корней родиолы розовой, с сахаром, без обогащающей добавки; д – настои жареного молотого кофе и листьев мяты перечной, CO_2 -экстракт корней родиолы розовой, с сукралозой, без обогащающей добавки; е – настои жареного молотого кофе, листьев мяты перечной, трубочек корицы, с сахаром, без обогащающей добавки; ф – настои жареного молотого кофе, листьев мяты перечной, трубочек корицы, с сукралозой, без обогащающей добавки; г – настой жареного молотого кофе, с сахаром и обогащающей добавкой; h – настой жареного молотого кофе, с сукралозой и обогащающей добавкой; i – настои жареного молотого кофе и листьев мяты перечной, CO_2 -экстракт корней родиолы розовой, с сахаром и обогащающей добавкой; j – настои жареного молотого кофе и листьев мяты перечной, CO_2 -экстракт корней родиолы розовой, с сукралозой и обогащающей добавкой; k – настои жареного молотого кофе, листьев мяты перечной и трубочек корицы, с сахаром и обогащающей добавкой; l – настои жареного молотого кофе, листьев мяты перечной и трубочек корицы, с сукралозой и обогащающей добавкой

Figure 4. Appearance of drinks: a – infusion of ground roasted coffee, with sugar, without additives; b – infusion of ground roasted coffee, with sucralose, without additives; c – infusions of roasted ground coffee and peppermint leaves, CO_2 -extract *Rhodiola rosea* root extract, with sugar, without additives; d – infusions roasted ground coffee and peppermint leaves, CO_2 -*Rhodiola rosea* root extract, with sucralose, without additives; e – infusions of roasted ground coffee, peppermint leaves, cinnamon tubes, with sugar, without additives; f – infusions of roasted ground coffee, peppermint leaves, cinnamon tubes, with sucralose, without additive; g – infusion of roasted ground coffee, with sugar and enriching additive; h – infusion of roasted ground coffee, with sucralose and additive; i – infusions of roasted ground coffee and peppermint leaves, CO_2 -extract *Rhodiola rosea* root extract, with sugar and additive; j – infusions of roasted ground coffee and peppermint leaves, CO_2 -extract *Rhodiola rosea* root extract, with sucralose and additive; k – infusions of roasted ground coffee, peppermint leaves and cinnamon tubes, with sugar and additive; and l – infusions of roasted ground coffee, peppermint leaves and cinnamon tubes, with sucralose and additive

На оценки за внешний вид, запах, вкус и послевкусие напитков фактор «наличие и количество полуфабриката из растительного сырья» оказывал значимое влияние ($\eta_p^2 = 52,2$ и $50,2$ % соответственно, $p < 0,001$), тогда как другие факторы («характер подслащающих веществ» и «наличие обогащающей добавки»), а также их взаимодействия, оказывали лишь случайное воздействие ($p > 0,05$).

Основные органолептические характеристики напитков формируются используемыми растительными полуфабрикатами в определенном количестве, что согласуется с С. Tamer *et al.* [19], К. Ghanem *et al.* [29] и F. Salar *et al.* [44]. Отсутствие значимого влияния подсластителя на формирование органолептических характеристик напитков соответствует результатам и исследований L. Acurio Arcos *et al.* [30], определившими, что использование сукралозы способно усилить фруктовый аромат и стимуляцию рецепторов на языке за счет взаимодействия компонентов сырья и гидрофобными группами подсластителя, однако в больших количествах способствует появлению горь-

кого послевкусия и ощущениям кислотности. Что касается аскорбиновой кислоты, то ее отсутствие значимого влияния на органолептические характеристики, по данным F. Oboh *et al.* [16], объясняется тем, что она, как и лимонная кислота, обуславливает только присутствие кислотности во вкусе.

Согласно данным таблицы 9, наибольшие оценки за внешний вид получили напитки на основе настоев жареного молотого кофе, листьев мяты перечной и трубочек корицы (в среднем 1,94 балла), а не только настоя жареного молотого кофе (в среднем 1,89 балла). Наименьшими оценками за запах, вкус и послевкусие отличались напитки только с настоем жареного молотого кофе (в среднем 2,68 балла), наибольшими – напитки на основе настоев жареного молотого кофе и листьев мяты перечной с CO_2 -экстрактом корней родиолы розовой (в среднем 2,74 балла).

Продолжительность хранения напитков оказывала значимое влияние на изменение органолептических оценок: для внешнего вида – $\eta_p^2 = 71,0$ %, $p < 0,001$; для запаха, вкуса и послевкусия – $\eta_p^2 = 98,8$ %, $p < 0,001$.

Таблица 9. Оценки органолептических показателей напитков, балл

Table 9. Sensory profile of functional beverages, points

Вариант напитка	Срок хранения, сутки		
	0 (a)	7 (b)	8 (c)
Внешний вид			
1 (A)	1,89 ± 0,02 ^{EFKLbc}	1,80 ± 0,02 ^{BD-FHJ-Lac}	1,72 ± 0,02 ^{BD-FHJ-Lab}
2 (B)	1,89 ± 0,02 ^{EFKLbc}	1,64 ± 0,01 ^{AC-GI-Lac}	1,57 ± 0,01 ^{AC-GI-Lab}
3 (C)	1,92 ± 0,03 ^{bc}	1,82 ± 0,03 ^{BDFHJLac}	1,75 ± 0,03 ^{BDFHJLab}
4 (D)	1,92 ± 0,02 ^{bc}	1,69 ± 0,02 ^{A-CEGIKLac}	1,59 ± 0,02 ^{A-CEGIKLab}
5 (E)	1,94 ± 0,02 ^{ABGHbc}	1,85 ± 0,02 ^{ABDFGHJLac}	1,77 ± 0,02 ^{ABDFGHJLab}
6 (F)	1,94 ± 0,02 ^{ABGHbc}	1,70 ± 0,02 ^{A-CEG-IKac}	1,63 ± 0,02 ^{A-CEG-IKab}
7 (G)	1,89 ± 0,02 ^{EFKLbc}	1,79 ± 0,01 ^{BD-FHJ-Lac}	1,72 ± 0,01 ^{BD-FHJ-Lab}
8 (H)	1,89 ± 0,02 ^{EFKLbc}	1,66 ± 0,01 ^{AC-GI-Lac}	1,57 ± 0,01 ^{AC-GI-Lab}
9 (I)	1,91 ± 0,03 ^{bc}	1,82 ± 0,03 ^{BDFHJLac}	1,74 ± 0,03 ^{BDFHJLab}
10 (J)	1,91 ± 0,02 ^{bc}	1,69 ± 0,01 ^{A-CEGIKLac}	1,59 ± 0,01 ^{A-CEGIKLab}
11 (K)	1,94 ± 0,02 ^{ABGHbc}	1,84 ± 0,02 ^{ABDFGHJLac}	1,76 ± 0,02 ^{ABDFGHJLab}
12 (L)	1,93 ± 0,02 ^{ABGHbc}	1,70 ± 0,02 ^{A-CEG-IKac}	1,60 ± 0,02 ^{A-CEG-IKab}
Запах, вкус и послевкусие			
1 (A)	2,67 ± 0,03 ^{CDIJbc}	2,23 ± 0,03 ^{CDIJac}	1,99 ± 0,02 ^{CDIJab}
2 (B)	2,67 ± 0,03 ^{CDIJbc}	2,23 ± 0,03 ^{CDIJac}	1,99 ± 0,02 ^{CDIJab}
3 (C)	2,74 ± 0,03 ^{ABGHbc}	2,29 ± 0,02 ^{ABGHac}	2,05 ± 0,02 ^{ABbab}
4 (D)	2,74 ± 0,03 ^{ABGHbc}	2,29 ± 0,02 ^{ABGHac}	2,05 ± 0,02 ^{ABbab}
5 (E)	2,72 ± 0,03 ^{bc}	2,26 ± 0,02 ^{ac}	2,01 ± 0,04 ^{ab}
6 (F)	2,71 ± 0,02 ^{bc}	2,26 ± 0,02 ^{ac}	2,02 ± 0,02 ^{ab}
7 (G)	2,69 ± 0,02 ^{CDIJbc}	2,24 ± 0,02 ^{CDIJac}	2,01 ± 0,02 ^{ab}
8 (H)	2,69 ± 0,02 ^{CDIJbc}	2,24 ± 0,02 ^{CDIJac}	2,01 ± 0,02 ^{ab}
9 (I)	2,74 ± 0,03 ^{ABGHbc}	2,29 ± 0,02 ^{ABGHac}	2,05 ± 0,02 ^{BAab}
10 (J)	2,74 ± 0,03 ^{ABGHbc}	2,29 ± 0,02 ^{ABGHac}	2,04 ± 0,02 ^{ABba}
11 (K)	2,71 ± 0,02 ^{bc}	2,26 ± 0,02 ^{ac}	2,02 ± 0,02 ^{ab}
12 (L)	2,70 ± 0,00 ^{bc}	2,25 ± 0,00 ^{ac}	2,01 ± 0,00 ^{ab}

Примечание: данные представлены в виде среднего значения ± SD. Различные буквы в верхнем индексе указывают на статистически значимые различия ($p < 0,05$): прописные – между напитками, строчные – между сроками хранения.

Note: Mean value ± SD. Different letters in the upper index indicate statistically significant differences ($p < 0.05$): Uppercase – between drinks, lowercase – between shelf life.

Сохранность оценок после 7 и 8 суток хранения продукции для внешнего вида составила в среднем 91,4 и 87,1 % соответственно (из-за снижения ощущений насыщенности окраски), для запаха, вкуса и послевкусия – 83,3 и 74,5 % соответственно (из-за ухудшения восприятий характерных и идентифицируемых особенностей продукции – кофе, мяты, родиолы розовой, корицы, а также снижения терпкости, насыщенности и длительности вкуса и послевкусия).

На сохранность оценок за внешний вид напитков влияли два фактора ($p < 0,001$). По фактору «наличие и количество полуфабриката из растительного сырья» лучшая сохранность отмечена у продукции, включающей настой жареного молотого кофе, листьев мяты перечной и трубочек корицы (после 7 и 8 суток в среднем 91,5 и 87,3 % соответственно), худшая – у продукции только с настоем жареного молотого кофе (в среднем 91,3 и 87,0 % соответственно). По фактору «характер подслащающих веществ» высокая сохранность отмечена у продукции с сахарозой (после 7 и 8 суток в среднем 95,0 и 91,0 % соответственно), низкая – у продукции с сукралозой (в среднем 87,9 и 83,2 % соответственно).

По истечении 7 суток хранения сохранность оценок за запах, вкус и послевкусие напитков не различалась в зависимости от наличия и количества полуфабриката из растительного сырья и составляла в среднем 83,3 %. По завершении 8 суток наихудшая сохранность отмечена для продукции, включающей настой жареного молотого кофе, листьев мяты перечной и трубочек корицы (74,4 %), по сравнению с продукцией только с настоем жареного молотого кофе или с настоями жареного молотого кофе и листьев мяты перечной с CO_2 -экстрактом корней родиолы розовой (в среднем 74,6 %, $p < 0,001$).

Уровень качеств напитков по органолептическим показателям снизился с «отличного» (4,56–4,66 балла непосредственного после изготовления) до «хорошего» (в среднем 4,01 балла) по истечении 7 суток хранения, а затем до «хорошего» (среднем 3,76 балла), и «удовлетворительного» (в среднем 3,61 балла) после 8 суток хранения соответственно для продукции, изготовленной с использованием сахарозы и сукралозы.

Наблюдаемые изменения органолептических характеристик продукции в процессе хранения полностью согласуются с опубликованными научными данными и объясняются комплексом биохимических и микробиологических процессов, характерных для хранения многокомпонентных напитков на растительной основе (окисление полифенольных соединений, разложение аскорбиновой кислоты, рост количества микроорганизмов и др.) [45]. Использование антиоксидантов (например аскорбиновой кислоты [38]) и правильный подбор подсластителей [30] могут замедлить эти процессы.

Входящий в состав напитков настоек жареного молотого кофе жареного обуславливал содержание кофеина

на уровне 2,46 мг/100 см³ продукции. Исследуемые напитки значимо не различались между собой по содержанию кофеина ($p > 0,05$). Содержание сукралозы в вариантах напитка 2, 4, 6, 8, 10 и 12 составляло в среднем 12,9 мг/100 см³. Продолжительность хранения оказывала значимое влияние на содержание кофеина во всех вариантах напитков ($\eta_p^2 = 6,7 \%$, $p < 0,05$), тогда как для сукралозы в напитках 2, 4, 6, 8, 10 и 12 влияние срока хранения статистически незначимо (изменения находились в пределах ошибки опыта, $p > 0,05$). Полученные данные о стабильности кофеина и сукралозы в процессе хранения напитков согласуются с результатами исследований, представленными в работах M. Quinlan *et al.* [26], A. С. Гаврилова и др. [46], P. De Sousa *et al.* [47].

Напитки, в состав которых входил CO_2 -экстракт корней родиолы розовой (варианты 3, 4, 9 и 10), значимо не различались между собой по содержанию этилового спирта ($p > 0,05$), которое составило в среднем 0,1 % и не изменялось на протяжении исследуемого периода хранения (8 суток, $p > 0,05$).

Содержание сухих веществ положительно коррелировало с количеством мезофильных аэробных и факультативно-анаэробных микроорганизмов ($r = 0,60$, $p < 0,05$). Отрицательная корреляционная связь с заменой сахарозы на сукралозу отмечена как для содержания сухих веществ ($r = -1,00$, $p < 0,05$), так и для количества микроорганизмов ($r = -0,58$, $p < 0,05$).

Кислотность напитков положительно коррелировала с содержанием мезофильных аэробных и факультативно-анаэробных микроорганизмов ($r = 0,54$, $p < 0,05$) и с оценками за внешний вид ($r = 0,39$, $p < 0,05$).

Содержание полифенольных соединений и флавоноидов в продукции имели сильные положительные корреляции с цветовыми координатами a^* и b^* , а также с насыщенностью цвета и углом цветового тона (r = от 0,66 до 0,98, $p < 0,05$), и отрицательные – с яркостью (r = от –0,85 до –0,98, $p < 0,05$). Связь полифенольных соединений и флавоноидов с углом тона отрицательная (r = от –0,82 до –0,96, $p < 0,05$). Положительные корреляционные связи ($r = 0,82$, $p < 0,05$) установлены между содержанием в напитках общего количества полифенольных соединений и флавоноидов.

Яркость цвета напитков отрицательно коррелировала с другими цветовыми координатами (a^* и b^*) и насыщенностью цвета ($r = -0,99$, $p < 0,05$), а с углом цветового тона – положительно ($r = 0,99$, $p < 0,05$). Между хроматическими координатами a^* и b^* , а также насыщенностью цвета отмечены положительные корреляции ($r = 0,98$ – $1,00$, $p < 0,05$), тогда как связи a^* , b^* , C^* с углом цветового тона (H°) отрицательны (r = от –0,98 до –1,00, $p < 0,05$).

Оценки за внешний вид напитков положительно коррелировали с содержанием общих полифенольных соединений и флавоноидов, а также с координатами

a^* , b^* и насыщенностью цвета ($r = 0,69–0,70$, $p < 0,05$) и отрицательно – с координатой L^* ($r = -0,71$) и углом тона ($r = -0,72$, $p < 0,05$). Оценки за запах и вкус напитков имели положительную связь с количеством мезофильных аэробных и факультативно-анаэробных микроорганизмов ($r = 0,63$, $p < 0,05$) и отрицательную – с сукралозой ($r = -0,93$, $p < 0,05$), а связи с полифенольными соединениями и флавоноидами оказались слабоположительными ($r = 0,28–0,30$). Содержание витамина С не имело выраженных корреляций с цветовыми показателями и обнаружило слабую отрицательную связь с кислотностью ($r = -0,30$, $p < 0,05$). Содержание кофеина в напитках не имело статистически значимых корреляционных связей с исследуемыми характеристиками качества ($p > 0,05$).

Таким образом, к 8 суткам хранения напитков наблюдали комплексное ухудшение их органолептических характеристик (снижение насыщенности окраски, ухудшение восприятия характерных оттенков растительных компонентов, терпкости и др.), подтвержденное статистически значимыми изменениями координаты L^* , увеличением кислотности и потерями витамина С в обогащенной продукции, позиционирующейся как функциональная, несмотря на микробиологическую безопасность. Следовательно, рекомендуемый срок хранения для напитков составляет 7 суток. При этом исследуемые напитки будут отвечать ожиданиям потребителей, поскольку обладают оригинальными вкусо-ароматическими характеристиками. Варианты напитков 7–12, обогащенные аскорбиновой кислотой, к концу рекомендуемого срока хранения (7 суток) содержат не менее 15,9 мг/100 см³ витамина С. Порция напитка объемом 200 см³ будет содержать примерно 31–33 мг витамина С, что покрывает около трети (31–33 %) рекомендуемой суточной нормы потребления для взрослых (100 мг согласно МР 2.3.1.0253-21). Варианты напитков 2, 4, 6, 8, 10 и 12 на сукралозе, относятся к категории «безкалорийные» (≤ 4 ккал/100 см³) согласно ГОСТ Р 56543-2015, т. к. их энергетическая ценность (1,10–2,61 ккал/100 см³) ниже предельного значения.

На основании проведенных исследований разработаны рецептуры напитков и уточнен перечень показателей качества, рекомендуемых для контроля: органолептические характеристики, массовая доля растворимых сухих веществ, титруемая кислотность, показатели функциональной направленности по витамину С (для обогащенных вариантов), содержание этилового спирта (для вариантов с СО₂-экстрактом корней родиолы розовой), а также микробиологические показатели безопасности.

Выводы

В результате проведенных исследований установлено значимое влияние ($p < 0,001$) фактора «разновидность растительного сырья и способ получения» на качество полуфабрикатов (настоев жареного моло-

того кофе, листьев мяты перечной, трубочек корицы, СО₂-экстракта корней родиолы розовой). СО₂-экстракт корней родиолы розовой показал наилучшие органолептические оценки, максимальное содержание биологически активных веществ и наиболее насыщенный цвет. Настой жареного молотого кофе получил наивысшие оценки за вкусоароматические свойства и был единственным источником кофеина.

На основе полуфабрикатов разработано 12 рецептур напитков, варьируемых по трем факторам: наличие и количество полуфабриката из растительного сырья, подслащивающее вещество (сахароза или сукралоза) и обогащение витамином С. Варианты напитков с сукралозой соответствуют критериям «без сахара» и «безкалорийный» (≤ 4 ккал/100 см³), а обогащенные (200 см³) – обеспечивают более 30 % от суточной нормы витамина С.

Подтверждено статистически значимое ($p < 0,05–0,001$) и неравнозначное влияние рецептурных факторов. Фактор «наличие и количество полуфабриката из растительного сырья» определял содержание полифенольных соединений в напитке, координату L^* , хроматические координаты, интенсивность цвета и цветовой тон, а также органолептические свойства напитков ($\eta_p^2 \geq 50$ %). Фактор «характер подслащивающих веществ» оказывал влияние на количество сухих веществ, сукралозы и микробиологические показатели ($\eta_p^2 \geq 42$ %), а добавка витамина С – на его содержание ($\eta_p^2 \geq 99,9$ %).

При хранении напитков отмечались рост кислотности, микробной обсемененности и ухудшение органолептических свойств, а в обогащенных – снижение содержания витамина С. Наибольшую стабильность показателей в процессе хранения продемонстрировали варианты напитков, содержащих комплексный состав полуфабрикатов из растительного сырья, сукралозы и аскорбиновой кислоты. Установлено, что продукция сохраняет качество и безопасность при соблюдении рекомендуемого срока годности, который составляет 7 суток.

Вариация вида растительных полуфабрикатов, системы подслащивания и использования аскорбиновой кислоты обеспечивает направленное формирование качества и стабильности безалкогольных напитков. Отнесение разработанных напитков к функциональным в исследовании обосновано обогащением витамином С согласно ГОСТ Р 56543-2015. Сукралоза использовалась в качестве подсластителя при замене сахарозы и рассматривалась как фактор, который связан со снижением содержания сахаров и энергетической ценности, а также обусловлен применением отличительных признаков в соответствии с ГОСТ Р 55577-2013, но не как самостоятельный критерий функциональности напитков. Результаты, полученные в рамках работы, вносят значительный вклад в создание современных функциональных продуктов питания.

Критерии авторства

Авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут ответственность за плагиат.

Contribution

All the authors contributed equally to the study and bear equal responsibility for information published in this article

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors state that there is no conflict of interest.

Список литературы / References

1. Azima AMS, Noriham A, Manshoor N. Phenolics, antioxidants and color properties of aqueous pigmented plant extracts: *Ardisia colorata* var. *elliptica*, *Clitoria ternatea*, *Garcinia mangostana* and *Syzygium cumini*. Journal of Functional Foods. 2017;38:232–241. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2017.09.018>
2. Plaskova A, Mlcek J. New insights of the application of water or ethanol-water plant extract rich in active compounds in food. Frontiers in Nutrition. 2023;10:1118761. <https://doi.org/10.3389/fnut.2023.1118761>
3. Shaik MI, Hamdi IH, Sarbon NM. A comprehensive review on traditional herbal drinks: Physicochemical, phytochemicals and pharmacology properties. Food Chemistry Advances. 2023;3:100460. <https://doi.org/10.1016/j.focha.2023.100460>
4. Cwиковá O, Komprda T, Šottníková V, Svoboda Z, Simonová J, et al. Effects of different processing methods of coffee *Arabica* on colour, acrylamide, caffeine, chlorogenic acid, and polyphenol content. Foods. 2022;11(20):3295. <https://doi.org/10.3390/foods11203295>
5. Makiso MU, Tola YB, Oqah O, Endale FL. Bioactive compounds in coffee and their role in lowering the risk of major public health consequences: A review. Food Science & Nutrition. 2024;12(2):734–764. <https://doi.org/10.1002/fsn3.3848>
6. Kelebek H, Carikcioglu M, Kadiroglu P, Ereli E, Uzlasir T, et al. Phenolic characterization and quality evaluation of herbal coffee from roasted juniper berry fruits (*Juniperus drupacea* L.): Elucidating the impact of roasting. Foods. 2024;13(23):3946. <https://doi.org/10.3390/foods13233946>
7. Poláková K, Bobková A, Demianová A, Bobko M, Lidikova J, et al. Quality attributes and sensory acceptance of different botanical coffee co-products. Foods. 2023;12(14):2675. <https://doi.org/10.3390/foods12142675>
8. Казакова М. А., Куркин В. А., Рыжов В. М., Лямин А. В., Козлов А. В. Сравнительное микробиологическое и фитохимическое исследование извлечений из листьев сортовых форм рода *Mentha* L. Разработка и регистрация лекарственных средств. 2025. Т. 14. № 1. С. 265–273. [Kazakova MA, Kurkin VA, Ryzhov VM, Lyamin AV, Kozlov AV. Comparative microbiological and phytochemical study of extracts from leaves of varietal forms of the genus *Mentha* L. Development and Registration of Medicines. 2025;14(1):265–273. (In Russ.)] <https://doi.org/10.33380/2305-2066-2025-14-1-1932>
9. Назарова Д. В., Темердашев З. А., Виницкая Е. А., Киселева Н. В., Нагалеvский М. В. Сравнительный анализ химического состава экстрактов из образцов растений рода *Mentha* L. после гидродистилляции и субкритической экстракции методом газовой хромато-масс-спектрометрии. Журнал аналитической химии. 2023. Т. 78. № 9. С. 837–847. [Nazarova DV, Temerdashev ZA, Vinitskaya EA, Kiseleva NV, Nagalevsky M.V. Comparative analysis of chemical compositions of *Mentha* L. plant extracts by gas chromatography–mass spectrometry after hydrodistillation and subcritical extraction. Journal of Analytical Chemistry. 2023;78(9):837–847. (In Russ.)] <https://doi.org/10.31857/S0044450223090098>
10. Машковский М. Д. Лекарственные средства. М.: Новая Волна, 2002. 540 с. [Mashkovsky MD. Medicinal products. Moscow: Novaya Volna; 2002. 540 p. (In Russ.)]
11. Hamatgaleeva GA. Development and research of a functional drink with the addition of peppermint extract. Modern Science and Innovations. 2022;2:83–95. <https://doi.org/10.37493/2307-910X.2022.2.8>
12. Лупанова И. А., Мизина П. Г., Ферубко Е. В., Мясникова С. Б. Изучение фармакологической активности экстрактов из суспензионных культур женьшеня обыкновенного и родиолы розовой. Патологическая физиология и экспериментальная терапия. 2023. Т. 67. № 2. С. 77–85. [Lupanova IA, Mizina PG, Ferubko EV, Myasnikova SB. Pharmacological activity of *Panax ginseng* and *Sedum roseum* cell cultures extracts. Pathological Physiology and Experimental Therapy. 2023;67(2):77–85. (In Russ.)] <https://doi.org/10.25557/0031-2991.2023.02.77-85>
13. Zakharenko AM, Razgonova MP, Pikula KS, Golokhvast KS. Simultaneous determination of 78 compounds of *Rhodiola rosea* extract by supercritical CO₂-extraction and HPLC-ESI-MS/MS spectrometry. Biochemistry Research International. 2021;7:1–16. <https://doi.org/10.1155/2021/9957490>
14. Błaszczyk N, Rosiak A, Kałużna-Czaplińska J. The potential role of cinnamon in human health. Forests. 2021;12(5):648. <https://doi.org/10.3390/f12050648>
15. Зиятдинова Г. К., Нгуен Конг Ф., Будников Г. К. Оценка антиоксидантных свойств мицеллярных экстрактов специй методом гальваностатической кулонометрии с электрогенерированными гексацианоферрат(III)-ионами. Журнал аналитической химии. 2015. Т. 70. № 8. С. 854. [Ziyatdinova GK, Nguyen Kong F, Budnikov G.K Assessment of the antioxidant properties of micellar spice extracts by galvanostatic coulometry with electrogenerated hexacyanoferrate(iii) ions. Journal of Analytical Chemistry. 2015;70(8):854. (In Russ.)] <https://doi.org/10.7868/S0044450215080228>

16. Oboh FO, Imafidon J. Antioxidant and sensory properties of new beverage formulations composed of palm sugar, *Aframomum melegueta*, and citric acid. *Beverages*. 2018;4(3):59. <https://doi.org/10.3390/beverages4030059>
17. Карпова М. О., Макарова Н. В., Игнатова Д. Ф., Будылин Д. В. Разработка технологии производства экстрактов зеленого кофе робуста (*Coffea canephora*): подбор степени измельчения и температуры экстракции. Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Процессы и аппараты пищевых производств. 2021. № 3. С. 49–59. [Karpova MO, Makarova NV, Ignatova DF, Budylin DV. Development of technology for the production of green coffee robusta extracts (*Coffea canephora*): Selection of grinding degree and extraction temperature. *Scientific Journal of the National Research University of ITMO. Series: Processes and Devices of Food Production*. 2021;3:49–59. (In Russ.)] <https://doi.org/10.17586/2310-1164-2021-14-3-49-59>
18. Shankar V, Mahboob S, Al-Ghanim KA, Ahmed Z, Al-Mulhm N, *et al.* A review on microbial degradation of drinks and infectious diseases: A perspective of human well-being and capabilities. *Journal of King Saud University – Science*. 2021;33(2):101293. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2020.101293>
19. Ghanem KZ, Ramadan MM, Mohammed AT, Mahmoud AE, Babintsev K, *et al.* Enhancing the antioxidant properties of functional herbal beverages using Ultrasonic-Assisted extraction: Optimized formulation and synergistic combinations of taurine and vit. *Heliyon*. 2024;10(15):e35685. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e35685>
20. Kutlu N, Pandiselvam R, Kamiloglu A, Saka I, Sruthi NU, *et al.* Impact of ultrasonication applications on color profile of foods. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2022;89:106109. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2022.106109>
21. Nowacka M, Dadan M, Janowicz M, Wiktor A, Witrowa-Rajhert D, *et al.* Effect of nonthermal treatments on selected natural food pigments and color changes in plant material. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 2021;20(5):5097–5144. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12824>
22. Агабалаев А. А., Каранкевич Е. Г., Булыга Д. М., Ковальчук И. В., Скаковский Е. Д. и др. Экстракция салидо-розида *Rhodiola rosea* L. Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия химических наук. 2012. № 4. С. 60–64. [Agabalaev AA, Karankevich EG, Bulyga DM, Kovalchuk IV, Skakovsky ED, *et al.* Extraction of salidroside *Rhodiola rosea* L. *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemical Sciences*. 2012;4:60–64. (In Russ.)]
23. Oulé KM, Dickman M, Arul J. Properties of orange juice with supercritical carbon dioxide treatment. *International Journal of Food Properties*. 2013;16(8):1693–1710. <https://doi.org/10.1080/10942912.2011.604893>
24. Tumbariski YD, Petrova N, Ivanov I, Petkova N, Ivanova P, *et al.* Assessment of the bioactivity, preservation potential and sensory acceptance of a propolis extract applied in a functional fruit-herbal beverage. *Food Science and Applied Biotechnology*. 2023;6(2):320–330. <https://doi.org/10.30721/fsab2023.v6.i2.302>
25. Dyab A, Bahloul HM, Ghazal GA, Mahmoud M, Abolila R. Production and evaluation of low-calorie pomegranate juice with sucralose. *Egyptian Journal of Food Science*. 2021;49(2):239–248. <https://doi.org/10.21608/EJFS.2021.64360.1099>
26. Quinlan ME, Jenner MF. Analysis and stability of the sweetener sucralose in beverages. *Journal of Food Science*. 1990;55(1):244–246. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1990.tb06061.x>
27. Al-Dabbas MM, Al-Qudsi JM. Effect of partial replacement of sucrose with the artificial sweetener sucralose on the physico-chemical, sensory, microbial characteristics, and final cost saving of orange nectar. *International Food Research Journal*. 2012;19(2):679–683.
28. Kizzie-Hayford N, Seidu-Larry S, Owusu-Ansah S, Quaye B, Ampofo-Asiama J. Influence of sweeteners on the phytochemical and physicochemical quality and consumer acceptability of roselle beverage. *Journal of Food Processing and Preservation*. 2024;2024(1):6669374. <https://doi.org/10.1155/2024/6669374>
29. Salar FJ, Agulló V, Domínguez-Perles R, García-Viguera C. Influence of sweeteners (sucrose, sucralose, and stevia) on bioactive compounds in a model system study for citrus–maqui beverages. *Foods*. 2022;11(15):2266. <https://doi.org/10.3390/foods11152266>
30. Acurio Arcos LP, Valencia Toapanta MF, Teresa Pacheco M, Teneda-Llerena WF. Effect of low-calorie sweeteners on sensory, physicochemical, and quality attributes of goldenberry (*Physalis peruviana* L.) juice. *Current Nutrition & Food Science*. 2024;20(1):92–102. <https://doi.org/10.2174/1573401319666230519142822>
31. Mao LC, Xu YQ, Que F. Maintaining the quality of sugarcane juice with blanching and ascorbic acid. *Food Chemistry*. 2007;104(2):740–745. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2006.09.055>
32. Ribárszki Á, Székely D, Szabó-Nótn B, Goczan B, Friedrich L, *et al.* Effect of ascorbic acid and acerola juice on some quality properties of aseptic filled apple juice. *Acta Alimentaria*. 2022;51(2):259. <https://doi.org/10.1556/066.2022.00030>
33. Feszterová M, Kowalska M, Mišaková M. Stability of vitamin c content in plant and vegetable juices under different storing conditions. *Applied Sciences*. 2023;13(19):10640. <https://doi.org/10.3390/app131910640>
34. Oszmianański J, Wolniak M, Wojdyło A, Wawer I. Influence of apple purée preparation and storage on polyphenol contents and antioxidant activity. *Food Chemistry*. 2008;107(4):1473–1484. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2007.10.003>
35. Patel GD, Patel NV, Bhatt Z, Raghavendra HR, Patel NB, *et al.* Development of technology for preparation of fortified tomato (*Solanum lycopersicum* L.) beverage. *IJCS*. 2020;8(2):2452–2459. <https://doi.org/10.22271/chemi.2020.v8.i2ak.9117>
36. Polumackanycz M, Kaszuba M, Konopacka A, Marzec-Wróblewska U, Wesolowski M, *et al.* Phenolic composition and biological properties of wild and commercial dog rose fruits and leaves. *Molecules*. 2020;25(22):5272. <https://doi.org/10.3390/molecules25225272>

37. Mittal S, Bajwa U. Effect of heat treatment on the storage stability of low calorie milk drinks. *Journal of Food Science and Technology*. 2014;51:1875–1883. <https://doi.org/10.1007/s13197-012-0714-z>
38. Maralanda A, Gamage KGR, Perumpuli B, Perera M, Karunarathna WKDS. Shelf life of pineapple and lime-flavoured, ascorbic acid-added and ready-to-serve sugarcane juice beverage. *Sugar and Sugar Derivatives: Changing Consumer Preferences*. 2020;273–282.
39. Kregiel D. Health safety of soft drinks: contents, containers, and microorganisms. *BioMed Research International*. 2015;1:128697. <https://doi.org/10.1155/2015/128697>
40. Skapska S, Marszałek K, Woźniak Ł, Szczepańska J, et al. The Development and consumer acceptance of functional fruit-herbal beverages. *Foods*. 2020;9(12):1819. <https://doi.org/10.3390/foods9121819>
41. Fatima K, Tehseen S, Ashfaq F, Bilal A, Khalid MZ, et al. Development and storage stability studies of functional fruit and vegetable-based drinks incorporated with polyphenols extracted from herbs and spices. *International Journal of Food Properties*. 2024;27(1):381–399. <https://doi.org/10.1080/10942912.2024.2317740>
42. Новикова И. В., Гребенщиков А. В., Романюк Т. И., Ковалева Т. С., Тарарыков М. П. и др. Разработка безалкогольных напитков на основе растительного сырья и коллагена и исследование их доклинической безопасности в опытах *in vivo*. Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. 2025. № 1. С. 108–114. [Novikova IV, Grebenshchikov AV, Romanyuk TI, Kovaleva TS, Tararykov MP, et al. Development of soft drinks based on plant raw materials and collagen and investigation of their preclinical safety *in vivo* experiments. *Food Technology*. 2025;1:108–114. (In Russ.)] <https://doi.org/10.26297/0579-3009.2025.1.15>
43. Минченко Л. А., Гиззатова Г. А. Микробиологическая безопасность и физико-химические показатели домашних напитков в походе. *Наукофера*. 2021. № 9–1. С. 1–5. [Minchenko LA, Gizzatova GA. Microbiological safety and physicochemical parameters of homemade beverages during a camping trip. *Naukosfera*. 2021;(9–1):1–5. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/JBQTTT>
44. Tamer CE, Yekeler FZ, Çopur ÖU, Karaman B, Suna S. A study of fortification of lemonade with herbal extracts. *Food Science and Technology (Campinas)*. 2016;37(1):45–51. <https://doi.org/10.1590/1678-457x.06016>
45. Al-Otabi FNM, Alqahtani NK, Mohamed HA, Alnemr TM, Ali S. The efficiency of natural plant extracts in improving storage stability, antioxidant activity, sensory evaluation, and physicochemical properties of date juice-based energy drink. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*. 2023;51(2):13107–13107. <https://doi.org/10.15835/nbha51213107>
46. Гаврилов А. С., Болотова А.В., Минниханова Е. Ю., Лесникова Н.А. Разработка рецептур напитков для диетического лечебного и диетического профилактического питания. XXI век: Итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. 2024. Т. 13. № 4. С. 191–198. [Gavrilov AS, Bolotova AV, Minnikhanova EYu, Lesnikova NA. Development of beverage formulations for dietary therapeutic and dietary preventive nutrition. *XXI Century: Resumes of the Past and Challenges of the Present Plus*. 2024;13(4):191–198. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/QGGLYG>
47. De Sousa PHM, Maia GA, De Azeredo HMC, Ramos AM, Figueiredo RWD, et al. Storage stability of a tropical fruit (cashew apple, acerola, papaya, guava and passion fruit) mixed nectar added caffeine. *International Journal of Food Science and Technology*. 2010;45(10):2162–2166. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2010.02383.x>

Дополнительная информация об авторах / Additional information about the authors

Голуб Ольга Валентиновна / Olga V. Golub ORCID 0000-0003-2561-9953; eLIBRARY SPIN 7857-0301
Захаренко Александр Михайлович / Alexander M. Zakharenko ORCID 0000-0002-9520-8271; eLIBRARY SPIN 7801-2882
Мотовилова Наталья Владимировна / Natalya V. Motovilova ORCID 0000-0002-2249-7666; eLIBRARY SPIN 4707-3430
Мотовилов Олег Константинович / Oleg K. Motovilov ORCID 0000-0003-2298-3549; eLIBRARY SPIN 1217-7717
Голохваст Кирилл Сергеевич / Kirill S. Golokhvast ORCID 0000-0002-4873-2281; eLIBRARY SPIN 7598-2190

<https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-2-2639>
<https://elibrary.ru/GCUDDN>

Оригинальная статья
<https://fptt.ru>

Химический синтез наночастиц селена: исследование метода и перспектив его применения



А. С. Жигайлов^{1,*}, Е. А. Вечтомова¹,
О. В. Козлова¹, А. Л. Верещагин²

¹ Кемеровский государственный университет , Кемерово, Россия

² Алтайский государственный технический университет имени И. И. Ползунова , Барнаул, Россия

Поступила в редакцию: 28.10.2025

Принята после рецензирования: 03.12.2025

Принята к публикации: 10.03.2026

*e-mail: szhigailov@ya.ru

© А. С. Жигайлов, Е. А. Вечтомова, О. В. Козлова,

А. Л. Верещагин, 2026



Аннотация.

Селен – жизненно важный микроэлемент, однако его биодоступность и токсичность сильно зависят от химической формы. Наночастицы селена (SeNPs) представляют значительный интерес благодаря повышенной биодоступности, низкой токсичности и выраженным антиоксидантным свойствам по сравнению с органическими и неорганическими формами селена. Ключевой проблемой в их применении остается агрегация частиц, ведущая к потере коллоидной стабильности. Цель исследования – изучить особенности получения наночастиц селена методом химического восстановления селенсодержащего прекурсора с использованием различных восстановителей; исследовать размер, морфологию и стабильность получаемых наночастиц и оценить перспективы их применения.

Объекты исследования – стабильные дисперсии наночастиц селена (SeNPs). Синтез наночастиц селена проводили методом химического восстановления селенистой кислоты (H_2SeO_3) в водной среде. В качестве восстановителей исследовали аскорбиновую кислоту и тиосульфат натрия. Для стабилизации образующихся наночастиц применяли полисорбат 80 (Tween 80), альгинат натрия и кукурузный крахмал. Полученные золи характеризовали методами УФ-спектрофотометрии (концентрация селена, калибровочные зависимости) и сканирующей электронной микроскопии с энергодисперсионным детектором (размер, морфология, элементный состав, распределение частиц). Дополнительно измеряли вязкость стабилизированных систем.

Установлено, что аскорбиновая кислота – более эффективный восстановитель, чем тиосульфат натрия. Наилучшая стабилизация достигнута с полисорбатом 80: образец на основе аскорбиновой кислоты и полисорбата 80 показал равномерное распределение селена с минимальным размером частиц (0,2–0,7 мкм) и максимальным содержанием Se (3,62 %). Высоковязкие стабилизаторы, напротив, провоцировали агрегацию. Оптимальное соотношение селенистая кислота:восстановитель составило 1:4.

Система на основе аскорбиновой кислоты и полисорбата 80 формирует дисперсии наночастиц селена с равномерным распределением, гидродинамическим радиусом порядка десятков нанометров и повышенной коллоидной стабильностью. Такие системы перспективны для применения в качестве источника селена при обогащении пищевых продуктов (хлебобулочных, молочных и мясных), а также при создании препаратов для биофортификации сельскохозяйственных культур.

Ключевые слова. Наночастицы селена, химический синтез, стабилизаторы, восстановители, агротехнологии, коллоидная стабильность

Для цитирования: Жигайлов А. С., Вечтомова Е. А., Козлова О. В., Верещагин А. Л. Химический синтез наночастиц селена: исследование метода и перспектив его применения. Техника и технология пищевых производств. 2026. Т. 56. № 2. С. 317–327. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-2-2639>

Chemical Synthesis of Selenium Nanoparticles: Application Prospects



Alexander S. Zhigailov^{1,*}, Elena A. Vechtomova¹,
Oksana V. Kozlova¹, Alexander L. Vereshchagin²

¹ Kemerovo State University^{ROR}, Kemerovo, Russia

² Polzunov Altai State Technical University^{ROR}, Barnaul, Russia

Received: 28.10.2025

Revised: 03.12.2025

Accepted: 10.03.2026

*e-mail: szhigailov@ya.ru

© A.S. Zhigailov, E.A. Vechtomova, O.V. Kozlova, A.L. Vereshchagin, 2026



Abstract.

Selenium is an essential micronutrient, but its bioavailability and toxicity depend on its chemical form. Selenium nanoparticles (SeNPs) are of significant interest due to their increased bioavailability, low toxicity, and pronounced antioxidant properties compared to organic and inorganic forms of selenium. However, particle aggregation, leading to a loss of colloidal stability, remains a key challenge in their industrial application. The research investigated the method of obtaining selenium nanoparticles by chemical reduction of a selenium-containing precursor using various reducing agents. The research objective was to study the size, morphology, and stability of the resulting nanoparticles and to evaluate the prospects for their application.

Stable selenium nanoparticles were synthesized by chemical reduction of selenious acid (H_2SeO_3) in an aqueous medium. Ascorbic acid and sodium thiosulfate were studied as reducing agents. Polysorbate 80 (Tween 80), sodium alginate, and corn starch were used to stabilize the resulting nanoparticles. The resulting solids were characterized by UV spectrophotometry to determine the selenium concentration and construct calibration curves. Particle size, morphology, elemental composition, and distribution within the samples were analyzed using scanning electron microscopy (SEM) with an energy-dispersive detector. The tests also included viscosity of the stabilized systems.

Ascorbic acid proved to be a more effective reducing agent than sodium thiosulfate. The best stabilization results belonged to Polysorbate 80. The sample based on ascorbic acid and Polysorbate 80 showed a uniform distribution of selenium with the smallest particle size (0.2–0.7 microns) and the highest selenium content (3.62%). Highly viscous stabilizers provoked agglomeration. The optimal ratio of H_2SeO_3 :reducing agent was 1:4.

When ascorbic acid served as a reducing agent and Polysorbate 80 as a stabilizer, the dispersion of selenium nanoparticles was uniform, the hydrodynamic radius was tens of nanometers, and the colloidal stability was high. Such systems are promising as a source of selenium in the fortification of bakery, dairy and meat food products, as well as in innovative biofortification of crops.

Keywords. Selenium nanoparticles, chemical synthesis, stabilizers, reducing agents, agricultural technology, colloidal stability

For citation: Zhigailov AS, Vechtomova EA, Kozlova OV, Vereshchagin AL. Chemical Synthesis of Selenium Nanoparticles: Application Prospects. Food Processing: Techniques and Technology. 2026;56(2):317–327. (In Russ.) <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-2-2639>

Введение

Селен (Se) – незаменимый микроэлемент, необходимый для функционирования большинства живых существ. Он является основным структурным компонентом ферментов, таких как глутатионпероксидаза, тиоредоксинредуктаза и дейодиназа, которые играют важную роль в антиоксидантной защите, правильной работе репродуктивной системы и мышц и профилактике онкологических заболеваний [1]. Элементарный селен не обладает биологической активностью, но выполняет свои биологические функции за счет включения в состав селеноцистеина и селенометионина с последующим встраиванием в белок. В организме человека селеновые аминокислоты интегрируются как минимум в 25 селенопротеинов.

В настоящее время внимание многих исследователей приковано к роли селена в поддержании широкого спектра физиологических процессов в организме, что обуславливает устойчивый интерес к изучению биологического значения этого элемента. В организм человека или животного селен поступает по цепочке: почва – растение – организм. Растения способны усваивать только ту часть селена, которая находится в подвижных водорастворимых формах, к ним относятся селенаты, обменно-поглощенные селениты и некоторые органические соединения [2].

Нанотехнологии – междисциплинарная область науки, занимающаяся получением, обработкой и применением наноматериалов. Их появление на мировой научной арене значительно расширило возможности

применения многих материалов. Благодаря тому, что наноматериалы обладают свойствами, отличными от характеристик сыпучих аналогов, некоторые из них нашли применение в новых областях [3–6]. Нанотехнологии служат перспективным инструментом во многих областях исследований: фармацевтике, сельском хозяйстве, пищевой и химической промышленности, электронике и машиностроении. Наноматериалы демонстрируют новые физические и химические свойства, связанные с их наноразмерностью. Один из таких материалов – элементарный селен. Синтез и применение наночастиц селена (SeNPs) привлекли внимание ученых в силу ряда преимуществ, включая химическую стабильность, биосовместимость и низкую токсичность [7]. Наночастицы селена предложены в качестве нового типа удобрений, их синтезируют с помощью физических, химических или биологических процессов, получая различные размеры, стабильность и биодоступность [8]. По сравнению с органическими и неорганическими соединениями селена, такими как селеновые аминокислоты и соли селеносодержащих кислот, наночастицы используются для обеспечения безопасности пищевых продуктов [9].

В пищевой промышленности наночастицы селена (SeNPs) перспективны как многофункциональные добавки за счет их антибактериальных свойств и способности продлевать срок хранения продуктов [10]. Наночастицы интегрируются в съедобные покрытия на основе альгината натрия, обеспечивая как защиту от микробной порчи гидропонных фруктов (например клубники), так и обогащение их селеном в биодоступной форме. Такие системы повышают питательную ценность продуктов, улучшают антиоксидантный потенциал и способствуют формированию функциональных пищевых ингредиентов [11].

Кроме того, применение SeNPs в агротехнологиях позволяет получать сельскохозяйственную продукцию с повышенным содержанием селена уже на этапе выращивания, что усиливает цепочку обогащения пищи микроэлементом от почвы до потребителя. Стабилизация наночастиц полисахаридами (альгинатом и крахмалом) и поверхностно-активными веществами обеспечивает их равномерное распределение в пищевых матрицах без потери коллоидной стабильности [12, 13].

Синтез наночастиц селена осуществляется двумя методами: «сверху вниз» и «снизу вверх». Первый из них основан на уменьшении размера макроскопического материала до более мелких частиц с помощью физических процессов (литографии, импульсной лазерной абляции, ультразвука, микроволн и электроосаждения) с последующей агрегацией с образованием наночастицы. Во втором случае синтез наночастиц происходит путем самосборки атомов, формирующих новое ядро, которое растет с получением нанометрических структур как химическими, так и биологическими процессами [14]. Химические методы синтеза наночастиц селена используют растворимые соедине-

ния микроэлемента. Эта группа методов заключается в восстановлении высоковалентного селена до простого состояния в восстановительной реакционной системе. Химическое восстановление селена обычно включает добавление стабилизаторов или диспергаторов и восстановителей в раствор селеносодержащего прекурсора. В качестве стабилизаторов выступают полисахариды, белки и поверхностно-активные вещества [15]. Химический синтез SeNPs требует использование таких реагентов, как боргидрид натрия, цитрат натрия и аскорбиновая кислота, которые оказывают восстанавливающее действие на селеносодержащий прекурсор. Наночастицы селена нестабильны и имеют тенденцию к агрегации, поэтому крайне важно разработать простые и эффективные методы повышения их дисперсности и стабильности. Как отражено в многочисленных работах, наноразмерный селен обладает выраженными антиоксидантными свойствами и низкой токсичностью по сравнению с неорганическими формами селена, что определяет его перспективность для биомедицинских применений.

В работе А. В. Блинова и др. [16] синтез наночастиц осуществляли методом химического восстановления селенистой кислоты (H_2SeO_3) в водной среде с применением кокамидопропилбетаина в качестве стабилизирующего агента. Были исследованы десять восстановителей, включая аскорбиновую кислоту, боргидрид натрия, тиомочевину, гидразин гидрохлорид и L-цистеин. Установлено, что наиболее эффективным восстановителем признана аскорбиновая кислота – средний гидродинамический радиус 12,93 нм, дзета-потенциал –16,69 мВ; в то время как у боргидрида натрия – 23,16 нм, –4,80 мВ; у тиомочевины – 21,85 нм, –9,71 мВ. При этом образцы, полученные с гидразином, тиосульфатом натрия и L-цистеином, демонстрировали склонность к коагуляции в течение 60 мин после синтеза. Оптимизация соотношения прекурсор:восстановитель показала, что для системы с аскорбиновой кислотой оптимальным признано молярное соотношение 1:4, обеспечивающее образование наночастиц с гидродинамическим радиусом 14 нм и высокой коллоидной стабильностью. Использование аскорбиновой кислоты в качестве восстановителя исключает образование газообразных побочных продуктов, что является существенным преимуществом по сравнению с другими исследованными восстановителями. Полученные результаты имеют важное значение для разработки эффективных методов синтеза стабильных наночастиц селена с контролируемыми характеристиками для потенциальных применений в медицине и биотехнологии.

Использование наночастиц селена для обогащения растений селеном представляет собой перспективное направление в пищевой промышленности, а также в агротехнологиях и бионанотехнологии. В связи с этим предложено синтезировать и применять эти наночастицы в качестве источника селена для растений.

Цель исследования – изучить особенности получения наночастиц селена методом химического восстановления селенсодержащего прекурсора с использованием различных восстановителей; исследовать размер, морфологию и стабильность получаемых наночастиц и оценить перспективы их применения.

Объекты и методы исследования

Объекты исследования – стабильные дисперсии наночастиц селена (SeNPs). Синтез наночастиц селена проводили методом химического восстановления прекурсора селена в водной среде в присутствии стабилизаторов согласно описанной ранее методике [16]. В качестве селенсодержащего прекурсора использовали селенистую кислоту (H_2SeO_3 , ЧДА, ООО «Компонент-Реактив», Россия). В ходе работы исследовали золи наночастиц селена, полученные с использованием восстановителей: аскорбиновой кислоты (пищевая марка, CSPC Pharmaceutical Group, Китай), тиосульфата натрия (АО «ХимМед», Россия), а также стабилизаторов: полисорбата 80 (Guangdong Runhua Chemistry Co., Ltd., Китай), альгината натрия (ООО «Реахим», Россия) и кукурузного крахмала (ООО ПО «Агрегат», Россия).

Селенистая кислота (H_2SeO_3) представляет собой бесцветные ромбические кристаллы, кристаллизующиеся из растворов SeO_2 с плотностью $3,004 \text{ г/см}^3$. Она хорошо растворима в воде, однако при нагревании до 72°C разлагается по перитектической реакции на SeO_2 и ее насыщенный раствор. Селенистая кислота – слабая и уступает сернистой. В кислых средах она легко окисляется пероксидом водорода или перманганатом калия до H_2SeO_4 , тогда как окисление хромом и бромом протекает обратимо. Более характерны для селенистой кислоты окислительные свойства: восстановление

сероводородом, диоксидом серы и иодоводородом до элементарного селена.

Аскорбиновая кислота – сильный восстановитель за счет наличия двух гидроксильных групп в молекуле. Механизм ее действия заключается в передаче электронов с образованием дегидроаскорбиновой кислоты.

Тиосульфат натрия – мягкий восстановитель, который вступает в реакцию с селенистой кислотой, образуя тетратионат и элементарный селен. Недостатком является более длительный период восстановления по сравнению с аскорбиновой кислотой.

Полисорбат (Tween 80) – неионный поверхностно-активный агент, используемый для стабилизации коллоидных растворов. Вещество образует защитную оболочку вокруг наночастиц, предотвращая их агрегацию и оседание.

Альгинат натрия – полисахарид, обладающий хорошими эмульгирующими и стабилизирующими свойствами. Полисорбат помогает удерживать наночастицы в суспензии, однако его растворимость в воде может быть ограничена, что затрудняет равномерное распределение в растворе.

Кукурузный крахмал служит источником углеводов и может действовать как стабилизирующий агент, образуя защитные оболочки вокруг наночастиц. Несмотря на это, его растворимость в холодной воде низка, что приводит к образованию мутного раствора и снижает эффективность стабилизации.

Использование наночастиц селена для обогащения растений представляет собой перспективное направление в агротехнологиях и бионанотехнологии. В связи с этим предложено синтезировать и использовать наночастицы в качестве источника селена для растений. Схема синтеза представлена на рисунке 1.



Рисунок 1. Схема химического синтеза

Figure 1. Chemical synthesis

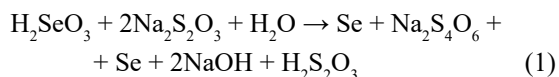
Мольные соотношения прекурсор:восстановитель подбирали исходя из литературных данных о протекании восстановительных реакций селена и предварительных экспериментов. Методика определения концентрации раствора наночастиц спектрофотометрическим методом на спектрофотометре ПЭ-5400УФ (ООО «Экохим», Россия), включает несколько этапов: приготовление стандартных растворов для построения калибровочного графика (из стандартного раствора высокой концентрации приготовили серию разбавленных растворов разной концентрации путем последовательного разбавления: 100, 75, 50, 25 и 0 %); измерение оптической плотности на длине волны, соответствующей максимуму поглощения ($\lambda = 345$ нм). Кинематическую вязкость определяли в соответствии с ГОСТ 33768-2015.

Электронно-микроскопическое исследование химического состава и размера наночастиц проводили методом сканирующей электронной микроскопии на микроскопе JSM-6390 (JEOL Ltd., Япония) с рентгеновским энергодисперсионным детектором JED 2300 (JEOL Ltd., Япония) в режиме регистрации: обратно-рассеянных электронов с конфигурацией детекторов электронов (контраст изображения преимущественно зависит от химического состава) и по характеристическому рентгеновскому излучению для определения химического состава и картирования элементов поверхности. Каплю образца наносили на проводящий двусторонний скотч, приклеенный к предметному столику. После высушивания образовавшийся осадок растерался по поверхности скотча.

Результаты и их обсуждение

Реакция между тиосульфатом натрия ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$) и селенистой кислотой (H_2SeO_3) происходит по механизму окислительно-восстановительных реакций, где $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ выступает в роли восстановителя, а H_2SeO_3 – окислителя. В ходе процесса тиосульфат натрия окисляется до тетрагидратата натрия ($\text{Na}_2\text{S}_4\text{O}_6$), тогда как селенистая кислота восстанавливается до элементарного селена (Se).

Общая схема реакции (1):

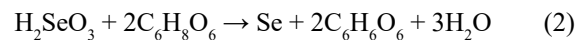


Скорость данной реакции ниже, а ее ход менее предсказуем. Визуально процесс сопровождается изменением окраски системы от бледно-красного до практически бесцветного состояния, что свидетельствует о вариативности размеров и распределения формирующихся наночастиц селена.

При использовании аскорбиновой кислоты ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6$) в качестве восстановителя процесс протекает стабильнее. Селенистая кислота выступает в роли окислителя, а аскорбиновая кислота – восстановителя. Аскорбиновая кислота теряет электроны и окисляется

до дегидроаскорбиновой кислоты ($\text{C}_6\text{H}_6\text{O}_6$), что сопровождается потерей двух электронов и двух протонов. Селенистая кислота принимает электроны от аскорбиновой кислоты и восстанавливается до элементарного селена (Se), при этом происходит образование воды и выделение протонов.

Общая схема реакции (2):



Кислая среда облегчает окисление аскорбиновой кислоты, способствуя протеканию реакции. В результате формируется раствор винного оттенка, что указывает на образование мелкодисперсных наночастиц селена.

Для стабилизации синтезированных наночастиц селена исследованы три типа стабилизаторов: альгинат натрия, полисорбат 80 (Tween 80) и кукурузный крахмал.

Альгинат натрия (вязкость 1,2588 мм²/с) – высоковязкий полимер, формирующий гелеподобные структуры. Обладает высокой влагоудерживающей способностью и эффективно защищает частицы от агрегации. Однако повышенная вязкость может затруднять транспортировку и обработку растворов. При использовании с аскорбиновой кислотой или тиосульфатом натрия получается прозрачный раствор, который со временем мутнеет и приобретает окраску, напоминающую морковный сок.

Полисорбат 80 (Tween 80, вязкость 0,7756 мм²/с) – низковязкий стабилизатор, хорошо диспергирующийся в водной среде, создавая тонкие защитные слои вокруг наночастиц и обеспечивая устойчивость коллоидной системы. В сочетании с аскорбиновой кислотой образует прозрачный раствор винного цвета, а с тиосульфатом натрия – прозрачный раствор бледно-красного оттенка.

Кукурузный крахмал (вязкость 0,8186 мм²/с) – обеспечивает вязкую среду, способствующую равномерному распределению наночастиц. Однако его медленная растворимость в воде осложняет получение однородных систем. Применение крахмала наиболее целесообразно для краткосрочного хранения. Растворы с данным стабилизатором имеют мутную консистенцию, визуально схожую с томатным соком.

Для подтверждения наличия селена в системе был проведен анализ спектров поглощения в диапазоне $\lambda = 200$ –800 нм. Наибольшая прозрачность наблюдалась у образцов, полученных с использованием аскорбиновой кислоты и тиосульфата натрия [17]. На рисунке 2 зарегистрирован характерный пик при $\lambda = 345$ нм, соответствующий наночастицам селена, что согласуется с литературными данными по спектрам коллоидного селена и дополнительно подтверждает формирование наночастиц в исследуемых системах [18].

Определение концентрации Se проводили спектрофотометрическим методом при $\lambda = 345$ нм. На рисунке 3 представлена градуировочная кривая.

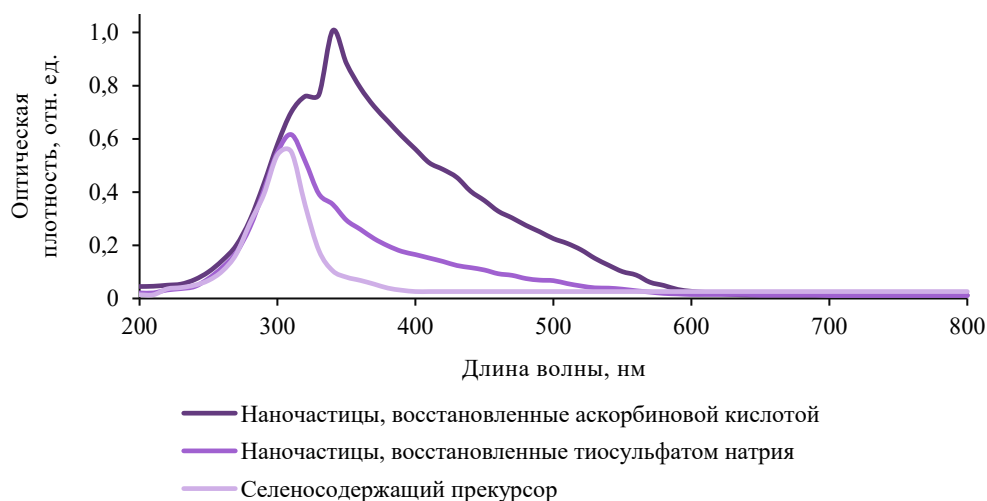


Рисунок 2. Спектры поглощения наночастиц селена

Figure 2. Absorption spectra of selenium nanoparticles

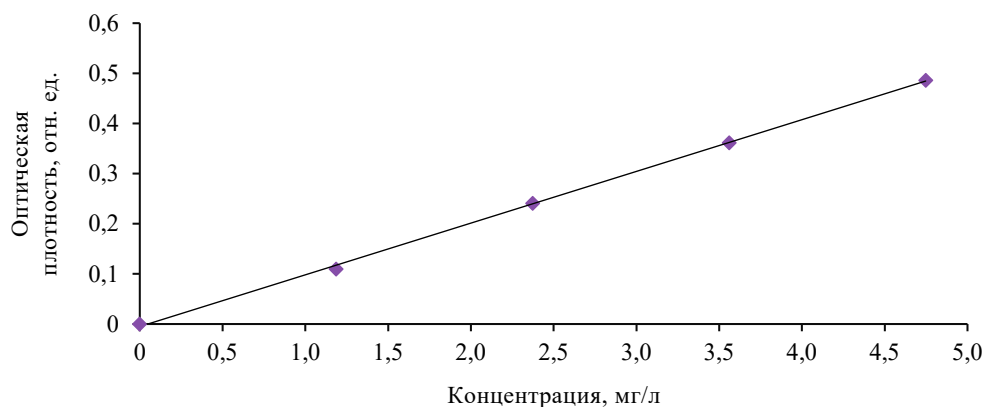


Рисунок 3. Градуировочная кривая определения концентрации селена

Figure 3. Calibration curve for determining selenium concentration

По результатам измерений построен график зависимости оптической плотности от концентрации. Проведена линейная аппроксимация полученных точек, уравнение прямой имеет вид:

$$D = 0,1031 \times Cm - 0,005$$

где D – оптическая плотность, отн. ед.; Cm – концентрация селена, мг/л.

Коэффициент корреляции ($R^2 = 0,9994$) близок к единице, что свидетельствует о хорошей линейности градуировочной кривой и позволяет использовать данную калибровку для количественного анализа селена в растворах.

Вязкость стабилизатора является одним из ключевых факторов, определяющих устойчивость систем наночастиц селена, влияя на подвижность и взаимодействие частиц в коллоидной системе, а также предотвращая их агрегацию.

При повышении вязкости стабилизатора подвижность наночастиц селена уменьшается вследствие подавления броуновского движения. Снижение скорости перемещения частиц приводит к уменьшению частоты их столкновений, тем самым минимизируя вероятность агрегации. Высоковязкие стабилизаторы, особенно полимерной природы, способны формировать более толстые защитные слои на поверхности наночастиц, усиливая пространственное отталкивание и повышая устойчивость коллоидной системы. Повышение вязкости среды также замедляет диффузию химических активных компонентов, обеспечивая контролируемое протекание процессов зародышеобразования и роста частиц, что способствует формированию более однородного распределения по размерам.

Однако чрезмерное увеличение вязкости может отрицательно сказаться на кинетике реакции и технологическом процессе. Ограничение массопереноса восстановителя или селеновой кислоты к реакционным

центрам способно приводить к неполному восстановлению прекурсора и неравномерному образованию зародышей. Кроме того, снижение текучести системы затрудняет стадии смешивания, обработки и последующей очистки продукта.

При низкой вязкости наночастицы селена сохраняют высокую подвижность, что приводит к частым столкновениям и повышает вероятность их агрегации. Стабилизаторы с низкой вязкостью также имеют тенденцию образовывать более тонкие защитные слои, которые не обеспечивают достаточного пространственного барьера, что приводит к снижению коллоидной стабильности со временем или при изменении условий окружающей среды. Графическое представление вязкости растворов представлено на рисунке 4.

Повышенная вязкость среды, характерная для альгината натрия, снижает подвижность частиц из-за подавления броуновского движения, что способствует уменьшению их агрегации. Одновременно высоковязкие

системы обеспечивают формирование более выраженных защитных слоев вокруг наночастиц, усиливая пространственное отталкивание между ними. Вместе с тем чрезмерное увеличение вязкости может отрицательно влиять на кинетику процесса, затрудняя массоперенос реагентов.

Стабилизаторы с более низкой вязкостью, такие как полисорбат 80 и крахмал, гарантируют лучшую текучесть системы, однако меньшая толщина стабилизирующего слоя повышает вероятность агрегации наночастиц.

На рисунках 5–10 представлены карты распределения частиц исследуемых образцов (1–6). Образец 1 представлял собой систему $\text{H}_2\text{SeO}_3 + \text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ + альгинат натрия; образец 2 – $\text{H}_2\text{SeO}_3 + \text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ + полисорбат 80; образец 3 – $\text{H}_2\text{SeO}_3 + \text{H}_2\text{SeO}_3$ + кукурузный крахмал; образец 4 – $\text{H}_2\text{SeO}_3 + \text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6$ + кукурузный крахмал; образец 5 – $\text{H}_2\text{SeO}_3 + \text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6$ + альгинат натрия; образец 6 – $\text{H}_2\text{SeO}_3 + \text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6$ + полисорбат 80.

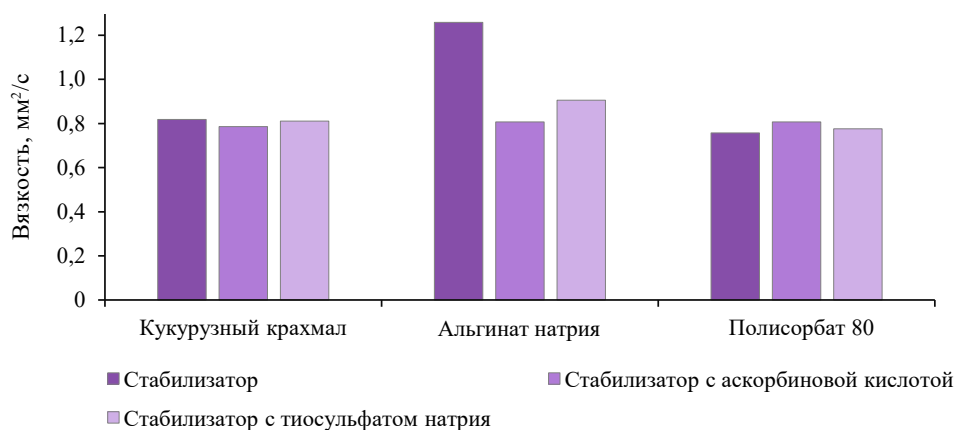


Рисунок 4. Вязкость растворов

Figure 4. Viscosity of solutions

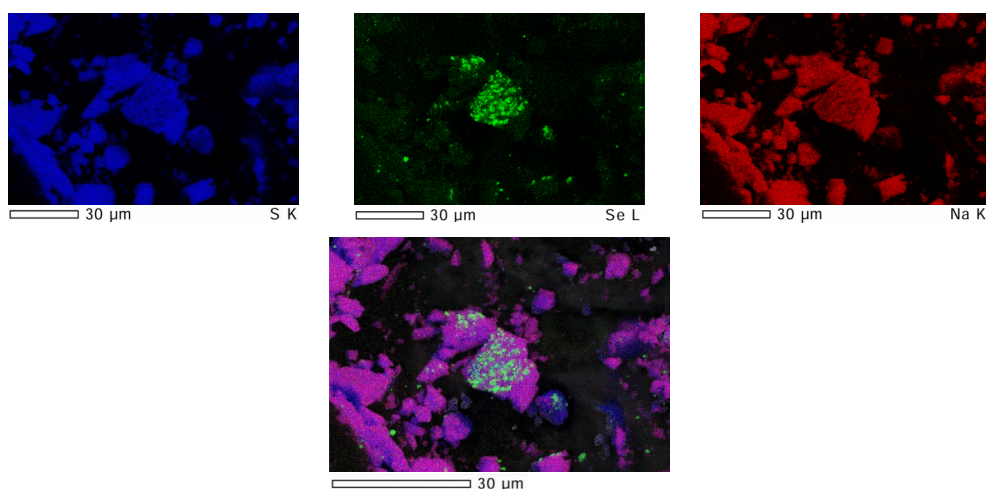


Рисунок 5. Карты распределения частиц образца 1

Figure 5. Particle distribution maps, Sample 1

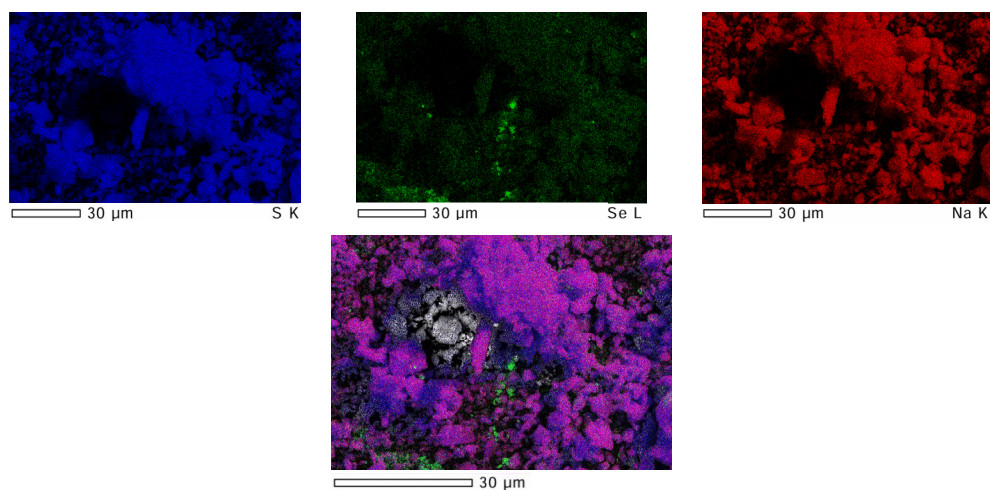


Рисунок 6. Карты распределения частиц образца 2

Figure 6. Particle distribution maps, Sample 2

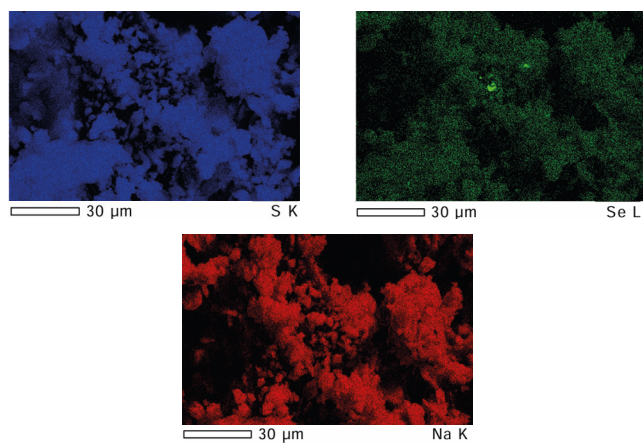


Рисунок 7. Карты распределения частиц образца 3

Figure 7. Particle distribution maps, Sample 3

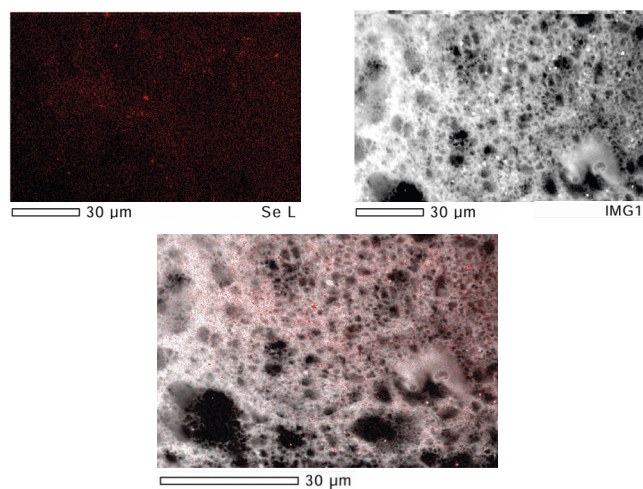


Рисунок 8. Карты распределения частиц образца 4

Figure 8. Particle distribution maps, Sample 4

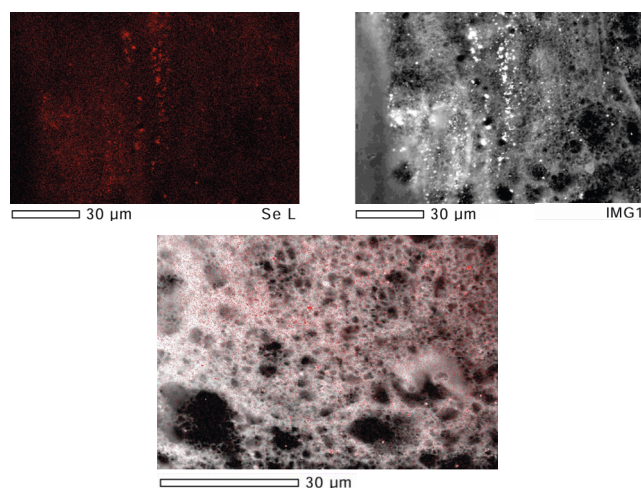


Рисунок 9. Карты распределения частиц образца 5

Figure 9. Particle distribution maps, Sample 5

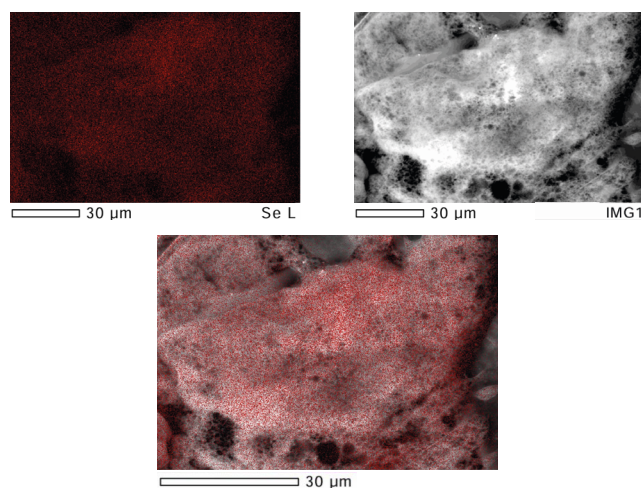


Рисунок 10. Карты распределения частиц образца 6

Figure 10. Particle distribution maps, Sample 6

Элементный состав образца 1 мас. %, углерод – 55,99; кислород – 25,93; натрий – 8,49; сера – 8,78; селен – 0,82. Селен обнаруживается в виде редких скоплений. Картирование показывает неравномерное распределение. На микрофотографиях (масштаб 30 мкм) наблюдаются агломераты размером 1–2 мкм.

Элементный состав образца 2 мас. %, углерод – 64,47; кислород – 21,49; натрий – 6,51; сера – 6,46; селен – 1,07. Селен распределен более равномерно по сравнению с образцом 1, но сохраняет тенденцию к кластеризации. Частицы меньшего размера (0,5–1,0 мкм), что указывает на лучшую диспергирующую способность полисорбата 80.

Элементный состав образца 3 мас. %, углерод – 21,27; кислород – 33,08; натрий – 20,36; сера – 24,21; селен – 1,08. Селен образует мелкие кластеры, но его общее содержание остается низким. Частицы размером 0,3–0,8 мкм с тенденцией к агломерации.

Элементный состав образца 4 мас. %, углерод – 44,96; кислород – 54,67; селен – 0,37. Селен обнаруживается в следовых количествах, четкие частицы не наблюдаются. Частицы не идентифицируются ввиду низкого содержания селена.

Элементный состав образца 5 мас. %, углерод – 56,80; кислород – 41,91; натрий – 0,24; сера – 0,11; селен – 0,94. Селен распределен точно, без образования крупных скоплений. Частицы размером 0,5–1,5 мкм, с умеренной агломерацией.

Элементный состав образца 6 мас. %, углерод – 62,80; кислород – 32,30; натрий – 0,96; сера – 0,31; селен – 3,62. Селен демонстрирует наиболее равномерное распределение среди всех образцов. Частицы мелкие (0,2–0,7 мкм), с минимальной агломерацией.

Наибольшая однородность распределения селена наблюдается в образце 6 ($\text{H}_2\text{SeO}_3 + \text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6 + \text{полисорбат 80}$), где селен равномерно диспергирован по поверх-

ности. В образцах с тиосульфатом натрия (1–3) распределение менее равномерное, с тенденцией к образованию кластеров.

Во всех образцах размеры частиц превышают наноразмерный диапазон (0,2–2,0 мкм). Наименьшие частицы зафиксированы в образцах с полисорбатом 80 (2 и 6), что подтверждает его эффективность в качестве стабилизатора.

Полисорбат 80 обеспечивает лучшую дисперсность частиц по сравнению с альгинатом натрия и кукурузным крахмалом. Высоковязкие стабилизаторы (альгинат и крахмал) способствуют агломерации, особенно в сочетании с тиосульфатом натрия.

Выводы

В результате исследования проведен химический синтез наночастиц селена восстановлением селенистой кислоты в водной среде с использованием различных восстановителей и стабилизаторов. Наиболее эффективным восстановителем признана аскорбиновая кислота, обеспечивающая быстрое и контролируемое протекание реакции без образования газообразных побочных продуктов. Среди исследованных стабилизаторов наилучшие результаты показал полисорбат 80, который способствовал формированию стабильных дисперсий наночастиц с минимальной склонностью к агрегации. Методами спектрофотометрии и электронной микроскопии подтверждено, что полученные таким образом наночастицы селена демонстрируют равномерное распределение в коллоидном растворе. При этом высоковязкие стабилизаторы (альгинат натрия и кукурузный крахмал), напротив, снижая подвижность частиц, могут провоцировать их агломерацию.

Дисперсии наночастиц селена представляют интерес не только для медицины и агротехнологий, но и для пищевой промышленности. Система « H_2SeO_3 – аскорбиновая кислота – полисорбат 80» может быть исполь-

зована при разработке селенсодержащих обогащающих добавок для хлебобулочных, молочных и мясных изделий, где наночастицы селена способны выполнять функцию источника микроэлемента и антиоксидантного компонента. Коллоидная стабильность и контролируемые размеры частиц обеспечивают равномерное распределение селена в пищевой матрице и повышение биодоступности при сниженной токсичности по сравнению с традиционными солями селена.

Критерии авторства

А. С. Жигайлов – проведение эксперимента, анализ данных, визуализация, подготовка исходного варианта рукописи. Е. А. Вечтомова – анализ данных, интерпретация результатов, редактирование рукописи. О. В. Козлова – руководство проектом, методология, утверждение окончательного варианта рукописи. А. Л. Верещагин – постановка научной проблемы, концептуализация исследования, обсуждение результатов и выводов.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution

A.S. Zhigailov performed the experiment, data analysis, and visualization, and drafted the manuscript. E.A. Vechtomova was responsible for the data analysis, interpretation, and proofreading. O.V. Kozlova supervised the project, developed the methodology, and proofread the manuscript. A.L. Vereshchagin formulated the scientific problem, developed the research concept, interpreted the results, and provided scientific counselling.

Conflict of interest

The authors declare no conflicts of interest.

Список литературы / References

1. Mehdi Y, Hornick J-L, Istasse L, Dufrasne I. Selenium in the environment, metabolism and involvement in body functions. *Molecules*. 2013;18(3):3292–3311. <https://doi.org/10.3390/molecules18033292>
2. Trippe III RC, Pilon-Smits EAH. Selenium transport and metabolism in plants: Phytoremediation and biofortification implications. *Journal of Hazardous Materials*. 2021;404:124178. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124178>
3. Filipović N, Ušjak D, Milenković MT, Zheng K, Liverani L, et al. Comparative study of the antimicrobial activity of selenium nanoparticles with different surface chemistry and structure. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. 2020;8:624621. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2020.624621>
4. Salishcheva OV, Prosekov AYU. Antimicrobial activity of mono- and polynuclear platinum and palladium complexes. *Foods and Raw Materials*. 2020;8(2):298–311. DOI: <http://doi.org/10.21603/2308-4057-2020-2-298-311>
5. Prasad J, Dixit A, Sharma SP, Mwakosya AW, Petkoska AT, et al. Nanoemulsion-based active packaging for food products. *Foods and Raw Materials*. 2024;12(1):22–36. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2024-1-585>
6. Eremeeva NB. Nanoparticles of metals and their compounds in films and coatings: A review. *Foods and Raw Materials*. 2024;12(1):60–79. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2024-1-588>
7. Hu J, Wang Z, Zhang L, Peng J, Huang T, et al. Seleno-amino acids in vegetables: A review of their forms and metabolism. *Frontiers in Plant Science*. 2022;13:804368. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124178>

8. Gudkov SV, Shafeev GA, Glinushkin AP, Shkirin AV, Barmina EV, *et al.* Production and use of selenium nanoparticles as fertilizers. *ACS Omega*. 2020;5(28):17767–17774. <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c02448>
9. D'Amato R, Regni L, Falcinelli B, Mattioli S, Benincasa P, *et al.* Current knowledge on selenium biofortification to improve the nutraceutical profile of food: A comprehensive review. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2020;68(14):4075–4097. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.0c00172>
10. Ao B, Du Q, Liu D, Shi X, Tu J, *et al.* A review on synthesis and antibacterial potential of bio-selenium nanoparticles in the food industry. *Frontiers in Microbiology*. 2023;14:1229838. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1229838>
11. Tran TH, Le XC, Tran TNM, Nguyen NTT, Pham BN, *et al.* Nano selenium–alginate edible coating extends hydroponic strawberry shelf life and provides selenium fortification as a micro-nutrient. *Food Bioscience*. 2023;53:102597. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2023.102597>
12. Bisht N, Phalswal P, Khanna PK. Selenium nanoparticles: A review on synthesis and biomedical applications. *Materials Advances*. 2022;3(3):1415–1431. <https://doi.org/10.1039/d1ma00639h>
13. Саримов Р. М., Асташев М. Е., Яныкин Д. В., Мартинович Г. Г., Семенова Н. А. и др. Наночастицы селена как полифункциональная добавка, обеспечивающая рост и развитие сельскохозяйственных культур: механизмы, эффективность, перспективы и ограничения. *Агрохимия*. 2025. № 6. С. 92–104. [Sarimov RM, Astashev ME, Yanikin DV, Martinovich GG, Semenova NA, *et al.* Selenium nanoparticles as a multifunctional additive that ensures the growth and development of agricultural crops: Mechanisms, effectiveness, prospects and limitations. *Agrochemistry*. 2025;(6):92–104. (In Russ.)] <https://doi.org/10.31857/S0002188125060124>
14. Garza-García JJ, Hernández-Díaz JA, Zamudio-Ojeda A, León-Morales JM, Guerrero-Guzmán A, *et al.* The role of selenium nanoparticles in agriculture and food technology. *Biological Trace Element Research*. 2023;200(5):2528–2548. <https://doi.org/10.1007/s12011-021-02847-3>
15. Zhang T, Qi M, Wu Q, Xiang P, Tang D, *et al.* Recent research progress on the synthesis and biological effects of selenium nanoparticles. *Frontiers in Nutrition*. 2023;10:1183487. <https://doi.org/10.3389/fnut.2023.1183487>
16. Блинов А. В., Блинова А. А., Рехман З. А., Гвозденко А. А., Голик А. Б. и др. Исследование процесса восстановления наночастиц селена. *Наноиндустрия*. 2023. Т. 16. № 5. С. 288–296. [Blinov AV, Blinova AA, Rekhman ZA, Gvozdenko AA, Golik AB, *et al.* Study of selenium nanoparticles reduction process. *Nanotechnologies*. 2023;16(5):288–296. (In Russ.)] <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2023.16.5.288.296>
17. Ельяшевич М. А. Периодический закон Д. И. Менделеева, спектры и строение атома (К истории физической интерпретации периодической системы элементов). *Успехи физических наук*. 1970. Т. 100. № 1. С. 5–43. [Yelyashevich MA. Periodic law of D.I. Mendeleev, spectra and structure of the atom (On the history of the physical interpretation of the periodic system of elements). *Successes of Physical Sciences*. 1970;100(1):5–43. (In Russ.)] <https://doi.org/10.3367/UFNr.0100.197001a.0005>
18. Alvi GB, Iqbal MS, Ghaith MMS, Haseeb A, Ahmed B, *et al.* Biogenic selenium nanoparticles (SeNPs) from citrus fruit have anti-bacterial activities. *Scientific Reports*. 2021;11(1):4811. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-84099-8>

Дополнительная информация об авторах / Additional information about the authors

Жигайлов Александр Сергеевич / Alexander S. Zhigailov ORCID 0009-0000-2128-5904; eLIBRARY SPIN 7190-4171
Вечтомова Елена Александровна / Elena A. Vechtomova ORCID 0000-0001-6842-4537; eLIBRARY SPIN 3569-8977
Козлова Оксана Васильевна / Oksana V. Kozlova ORCID 0000-0002-2960-0216; eLIBRARY SPIN 9985-6468
Верещагин Александр Леонидович / Alexander L. Vereshchagin ORCID 0000-0003-4510-720X; eLIBRARY SPIN 4122-2828

<https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-2-2640>
<https://elibrary.ru/FSGMYE>

Обзорная статья
<https://fptt.ru>

Антипитательные факторы в растительном сырье и пути снижения их содержания



Н. Н. Алёхина^{1,*}, Л. В. Антипова¹, В. Г. Лобанов²,
Е. И. Пономарева¹, В. Н. Нартова¹

¹ Воронежский государственный университет инженерных технологий^{ROR}, Воронеж, Россия

² Кубанский государственный технологический университет^{ROR}, Краснодар, Россия

Поступила в редакцию: 03.03.2026

Принята после рецензирования: 06.04.2026

Принята к публикации: 05.05.2026

*e-mail: nadinat@yandex.ru

© Н. Н. Алёхина, Л. В. Антипова, В. Г. Лобанов,
Е. И. Пономарева, В. Н. Нартова, 2026



Аннотация.

Растительное сырье – ключевой источник питательных веществ для человека и животного. Однако пищевая ценность продуктов растительного происхождения ограничена наличием антипитательных веществ (антинутриентов). Цель исследования – собрать и систематизировать современные данные об основных антипитательных веществах, их влиянии на организм человека и эффективных способах снижения уровня таких соединений в пищевых системах растительного происхождения.

Объектами исследования являлись научные статьи российских и зарубежных ученых, находящиеся в открытом доступе. Поиск осуществляли по информационным базам PubMed, eLIBRARY.RU, CyberLeninka и с помощью поисковой системы Google Scholar. Период поиска – с 2021 по 2026 гг. Для систематизации найденной информации использовали методы анализа, сравнения и описания.

В работе проанализированы основные классы антипитательных соединений: ингибиторы ферментов (протеаз и α -амилазы), фитиновая кислота (фитаты), лектины, танины и сапонины. Описаны их химическая природа, источники и двойственная физиологическая роль, связанная с негативным воздействием на биодоступность и усвояемость макро- и микронутриентов, а также с потенциальной пользой для организма (антиоксидантные, противовоспалительные и гипогликемические свойства) в контролируемых концентрациях. Оценена эффективность традиционных способов (замачивание, проращивание, ферментация, термическая обработка) и инновационных технологий (экструзия, обработка ультразвуком, высоким гидростатическим давлением и импульсным электрическим полем) для снижения содержания антинутриентов.

Проведенный анализ традиционных и новых методов показывает необходимость использования комбинированных технологий обработки растительных пищевых систем для эффективного устранения антипитательных факторов и максимального сохранения полезных компонентов как условия повышения их пищевой ценности.

Ключевые слова. Антипитательные вещества, растительное сырье, ингибиторы ферментов, фитаты, лектины, танины, сапонины, обработка, пищевая ценность

Для цитирования: Алёхина Н. Н., Антипова Л. В., Лобанов В. Г., Пономарева Е. И., Нартова В. Н. Антипитательные факторы в растительном сырье и пути снижения их содержания. Техника и технология пищевых производств. 2026. Т. 56. № 2. С. 328–341. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-2-2640>

Anti-Nutritional Factors in Plant Raw Materials: Reduction Strategies



Nadezhda N. Alekhina^{1,*}, Ludmila V. Antipova¹,
Vladimir G. Lobanov², Elena I. Ponomareva¹, Valeria N. Nartova¹

¹ Voronezh State University of Engineering Technologies^{ROR}, Voronezh, Russia

² Kuban State Technological University^{ROR}, Krasnodar, Russia

Received: 03.03.2026

Revised: 06.04.2026

Accepted: 05.05.2026

*e-mail: nadinat@yandex.ru

© N.N. Alekhina, L.V. Antipova, V.G. Lobanov, E.I. Ponomareva,

V.N. Nartova, 2026



Abstract.

Plant raw materials are a key source of nutrients for humans and animals. However, their nutritional value is limited by the presence of anti-nutritional substances (antinutrients). This review systematizes the research on the chemical nature, functions, and reduction methods available for anti-nutritional compounds in food systems of plant origin.

The review covered Russian and foreign scientific articles in the public domain (Google Scholar) registered in PubMed, eLIBRARY.RU, and CyberLeninka in 2021–2026.

Anti-nutritional substances include enzyme inhibitors (proteases and α -amylase), phytic acid (phytates), lectins, tannins, and saponins. The publications under review feature such aspects as their chemical nature, sources, and dual physiological roles, including the negative impact on the bioavailability and digestibility of macro- and micronutrients. Some studies focus on their potential benefits, e.g., antioxidant, anti-inflammatory, and hypoglycemic properties in controlled concentrations. The review includes a comparative analysis of traditional methods (soaking, germination, fermentation, heat treatment) and innovative technologies (extrusion, ultrasound treatment, high hydrostatic pressure, pulsed electric field).

Combined processing technologies prove to be the most effective approach to reducing anti-nutritional factors in plant-based food systems while preserving their beneficial components.

Keywords. Anti-nutritional factors, plant raw materials, enzyme inhibitors, phytates, lectins, tannins, saponins, processing, nutritional value

For citation: Alekhina NN, Antipova LV, Lobanov VG, Ponomareva EI, Nartova VN. Anti-Nutritional Factors in Plant Raw Materials: Reduction Strategies. Food Processing: Techniques and Technology. 2026;56(2):328–341. (In Russ.) <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-2-2640>

Введение

Растительные пищевые системы – один из основных источников питания в рационе людей и животных. Растительная пища содержит различные биологически активные компоненты, способствующие укреплению здоровья людей, в т. ч. за счет снижения риска развития хронических неинфекционных заболеваний [1].

Основные продовольственные культуры, выращиваемые по всему миру, – злаковые (пшеница, рожь, ячмень, рис, кукуруза, овес, просо, гречиха и др.) и бобовые (горох, фасоль, чечевица, нут, соя и др.). Зернобобовые культуры известны как источники растительного белка (20–37 %), характеризующегося оптимальным набором незаменимых аминокислот, в т. ч. с высокой долей лизина – аминокислоты, дефицитной для злаков. При этом к лимитирующим аминокислотам бобовых относятся серосодержащие – метионин и цистеин. Эти культуры содержат резистентный

и медленно усваиваемый крахмал и отличаются значительным содержанием пищевых волокон, витаминов группы В, минеральных веществ (магния, калия, железа, цинка, фосфора, кальция), а также биоактивных фитохимических веществ, обеспечивая высокую антиоксидантную активность [2, 3]. По результатам исследований известно, что включение зернобобовых в рацион оказывает благоприятные для здоровья физиологические эффекты: предотвращает или замедляет развитие ряда заболеваний, таких как ишемическая болезнь сердца, ожирение и сахарный диабет, благодаря низкому гликемическому индексу [4].

При этом злаки характеризуются небольшим содержанием белка (7–15 %) и высокой долей углеводов, пищевых волокон, витаминов и минеральных веществ. По сравнению с бобовыми злаковые культуры имеют значительное содержание аминокислот метионина и цистеина, которые обладают нутрицевтическими

свойствами, влияющими на снижение риска сердечно-сосудистых заболеваний и возникновения опухолей. Однако пищевая ценность зерновых продуктов зависит от сохранности макро- и микронутриентов исходных частей зерна, причем большинство из них в процессе переработки удаляется. Вместе с тем цельнозерновые ингредиенты, обладая богатым химическим составом, имеют низкую усвояемость, в т. ч. из-за наличия антипитательных веществ [5, 6].

Антипитательные факторы (антинутриенты) представляют собой биоактивные соединения, синтезируемые растениями в качестве вторичных метаболитов для обеспечения биохимической защиты от травоядных животных, воздействия конкурирующих растительных видов и неблагоприятных условий окружающей среды. Антинутриенты оказывают негативное влияние на биодоступность питательных веществ в организме как человека, так и животного. Присутствие этих соединений в продуктах растительного происхождения снижает их пищевую ценность за счет ингибирования процессов переваривания, подавления активности ферментов организма, а также нарушения всасывания и усвоения нутриентов (минералов, белков и витаминов). Тем не менее степень негативного воздействия антинутриентов на биодоступность пищевых компонентов зависит от вида и концентрации этих соединений, способности взаимодействовать с другими веществами и методов обработки пищевых систем [7, 8].

Основные антипитательные соединения, содержащиеся в растительных продуктах, – ингибиторы ферментов, фитиновая кислота, сапонины, танины и лектины. В соответствии с критерием термической стабильности антинутриенты можно классифицировать на две группы: термостабильные (фитиновая кислота, сапонины и конденсированные танины) и термолабильные соединения (ингибиторы ферментов и лектины) [9].

Для снижения содержания антипитательных веществ в растительном сырье применяют различные методы обработки, в т. ч. традиционные способы: очистка и измельчение, термообработка, замачивание, проращивание и ферментация. Применение таких методов, особенно их комбинированное использование, обладает высокой эффективностью в отношении уменьшения количества антинутриентов, но при этом также может приводить к потере важных питательных соединений. В связи с этим актуальны новые способы воздействия, такие как экструзия, облучение, обработка высоким гидростатическим давлением, холодной плазмой, импульсным электрическим полем, микроволновая и ультразвуковая обработка и другие методы, позволяющие сохранить ценные нутриенты продукта и повысить их биодоступность [10].

В последнее время многие исследования указывают на возможное полезное влияние антипитательных соединений в контролируемых концентрациях для организма человека и животного, что подчеркивает неоднозначность их биологически активных свойств [11].

Исходя из этого, цель исследования – собрать и систематизировать современные данные об основных антипитательных веществах, их влиянии на организм человека и эффективных способах снижения уровня таких соединений в пищевых системах растительного происхождения.

Объекты и методы исследования

Объектами исследования являлись научные статьи российских и зарубежных ученых, находящиеся в открытом доступе и посвященные антипитательным факторам пищевых систем растительного происхождения, а также методам их инактивации. Литературный поиск проводили за период 2021–2026 гг. с использованием информационных баз данных: PubMed (ключевые слова – anti-nutritional factors, legumes, enzyme inhibitors, phytic acid, saponins, tannins, lectins, soaking, germination, fermentation, cooking, extrusion, ultrasound, high pressure, pulsed electric field), eLIBRARY.RU (ключевые слова – антипитательные вещества, бобовые культуры, ингибиторы ферментов, фитаты, танины, сапонины, лектины, замачивание, проращивание, ферментация, термическая обработка, экструзия, ультразвук, высокое давление, импульсное электрическое поле), CyberLeninka (ключевые слова – антипитательные вещества, зернобобовые, ингибиторы ферментов, фитиновая кислота, танины, сапонины, лектины, замачивание, проращивание, ферментация, термическая обработка, экструзия, ультразвук, высокое давление, импульсное электрическое поле) и с помощью поисковой системы Google Scholar.

Для систематизации найденной информации использовали методы анализа, сравнения и описания.

Результаты и их обсуждение

Воздействие антинутриентов на физиологические процессы в питании человека основано, прежде всего, на механизмах хелатирования и комплексообразования, ингибирования активности ферментов и влияния на проницаемость кишечника. Приведем основные виды антипитательных веществ, содержащихся в растительном сырье и продуктах на его основе.

Ингибиторы ферментов. Практически во всех злаках и бобовых культурах присутствуют ингибиторы ферментов, ключевые из которых влияют на активность протеаз и α -амилазы в пищеварительном тракте.

Ингибиторы протеолитических ферментов воздействуют на сериновые протеазы (трипсин и химотрипсин), что приводит к ухудшению переваривания белка и всасывания аминокислот. Эти антинутриенты по своей природе являются белками с низкой молекулярной массой, подавляющими активность пищеварительных ферментов посредством образования межбелковых взаимодействий и блокирования их активного центра [12]. Они делятся на ингибиторы Кунитца (ИК) и ингибиторы Боумана-Бирка (ИББ). ИК представляют собой белок глобулинового типа с молекулярной массой 18–24 кДа и изоэлектри-

ческой точкой при pH 4,5. Его первичная структура включает 170–200 аминокислотных остатков и два дисульфидных мостика. ИББ состоят из 71 аминокислоты, содержат семь дисульфидных связей и имеют два независимых реактивных участка ингибирования за счет наличия структурных N- и C-концевых доменов, блокирующих каталитические центры трипсина и химотрипсина. Соответственно, ИББ могут образовывать как бинарный комплекс с трипсином или химотрипсином, так и тройную структуру с обоими ферментами. ИББ более термоустойчивы по сравнению с ИК, которые при термическом воздействии могут объединяться с другими белковыми молекулами вследствие нековалентных или дисульфидных взаимодействий, что приводит к снижению трипсинингибирующей активности, тогда как структурная целостность ИББ сохраняется [13].

Основные источники ингибиторов протеаз – бобовые культуры, в меньшей степени – злаки (пшеница, ячмень, овес) и картофель. Исследования показывают, что наибольшее содержание ингибитора трипсина наблюдается в сое (46 единиц трипсинингибирующей активности (ТИА/мг)) по сравнению с другими бобовыми – в горохе (3–5 ТИА/мг), чечевице (5–7 ТИА/мг), нуте (14–16 ТИА/мг) и фасоли обыкновенной (15–21 ТИА/мг). Показатели химотрипсинингибирующей активности (ХИА) были наивысшими и в соевых бобах (30 ХИА/мг) по сравнению с фасолью (17–25 ХИА/мг), нутом (11–14 ХИА/мг), чечевицей (3–5 ХИА/мг) и горохом (2–4 ХИА/мг). Содержание ингибиторов протеаз может варьироваться в зависимости от вида и сорта культур [14].

В организме человека ингибиторы, блокируя ферментативную активность протеаз в двенадцатиперстной кишке, способствуют усилению выработки холецистокинина – гормона, стимулирующего выделение ферментов поджелудочной железы и при этом повышающего потребность организма в серосодержащих аминокислотах. Такая реакция регулирует секрецию протеаз, однако подобное воздействие ингибиторов ферментов приводит к гипертрофии и гиперплазии поджелудочной железы. Повышенное содержание ингибиторов протеаз в рационе животных вызывает снижение усвоения азота, общей скорости роста организма, а также биодоступности серосодержащих аминокислот и белков [15]. Положительное действие ингибиторов протеаз связано с их антиканцерогенными свойствами, которые предотвращают возникновение рака толстой кишки и молочных желез. Кроме того, эти антинутриенты могут использоваться при лечении ожирения благодаря способности регулировать аппетит и замедления опорожнения желудка, создавая чувство насыщения [11].

Ингибиторы α -амилазы – термолабильные соединения белковой природы, блокирующие ферментативную активность амилазы за счет межмолекулярных сил, водородных и электростатических взаимодействий.

Наличие и концентрация природных ингибиторов зависят от сорта и анатомической части зерна. Среди злаковых и бобовых культур наибольшее содержание выявлено в различных видах фасоли (особенно белой), а также в оболочках пшеницы, ячменя, ржи, риса, проса и сорго [16].

Ингибирование действия α -амилазы поджелудочной железы способствует снижению степени расщепления крахмала, препятствуя усвоению и всасыванию углеводов в организме человека, что влияет на замедление образования глюкозы и может использоваться для регулирования ее уровня в плазме крови. Таким образом, ингибиторы амилазы могут применяться в лечении людей, страдающих сахарным диабетом или ожирением, при выборе оптимального рациона человека. Однако повышенное поступление ингибиторов в организм приводит к нарушениям работы желудочно-кишечного тракта (тошнота, диарея и рвота) [11, 17].

Фитиновая кислота (фитаты). Фитиновая кислота (мио-инозитол-1,2,3,4,5,6-гексакисдигидрофосфат) – природное соединение, служащее главной формой хранения фосфора в тканях растений. Это вещество обладает сильными хелатирующими свойствами за счет наличия шести фосфатных групп, способных связывать двух- и трехвалентные катионы металлов, – железо, цинк, кальций, марганец, медь и магний. Образование таких комплексов ограничивает биодоступность связанных минеральных веществ из-за образования нерастворимых солей, что снижает усвоение элементов в пищеварительном тракте и может вызвать их дефицит в организме человека. Формирование фитатно-минеральных комплексов зависит от pH, вида элемента, конкурирующих лигандов и ионной связи. Также фитиновая кислота взаимодействует с пищеварительными ферментами, белками и крахмалом, влияя на усвоение питательных веществ в желудочно-кишечном тракте организма. Фитаты (соли фитиновой кислоты) из-за недостаточного количества фитаз в пищеварительном тракте человека и животных с однокамерным желудком не подвергаются расщеплению и всасыванию в кишечнике, хотя данный процесс возможен при воздействии фитазной активности микрофлоры и кислотой среды желудка [18, 19].

Фитиновая кислота и ее соли составляют от 50 до 80 % от общего содержания фосфора в растениях. Данные соединения присутствуют преимущественно в семенах и зернах злаковых, бобовых и масличных культур, орехах. При этом особое внимание уделяется зародышу кукурузы, сое, рису, фасоли и арахису. Известно, что в однодольных культурах (пшеница, рис, кукуруза) фитаты накапливаются в алейроновом слое, оболочке или зародыше, что обуславливает частичное удаление при переработке, а в двудольных (бобовые, масличные, орехи) образуют прочную связь с белками и являются трудноотделимыми [20].

Фитиновая кислота обладает сильными антиоксидантными свойствами: уменьшает пероксидное окис-

ление липидов посредством нейтрализации свободных радикалов фосфатными и гидроксильными группами, а также защищает семена от окислительного воздействия благодаря связыванию железа. Связывание крахмала и снижение его усвояемости фитиновой кислотой могут быть полезны для контроля уровня глюкозы в крови для людей, страдающих сахарным диабетом. Также это соединение обладает противовоспалительными и антиканцерогенными свойствами, снижающими риск возникновения и развития рака толстой кишки и обострения кишечных заболеваний. Фитиновая кислота благоприятно влияет на сердечно-сосудистую систему за счет снижения уровня холестерина и триглицеридов в сыворотке крови, что предотвращает гиперхолестеринемия и атеросклероз. По мнению некоторых международных организаций, отрицательное воздействие фитиновой кислоты на организм человека можно нивелировать при соблюдении ее безопасной суточной дозы, составляющей не более 25 мг на 100 г пищи [11, 21].

Лектины. Лектинами называют вещества белковой природы, вызывающие агглютинацию клеток благодаря высокоизбирательному связыванию углеводных остатков на их поверхности. В отсутствие известной специфичности к сахарам их также именуют гемагглютинидами. Данные антинутриенты в зависимости от количества и структурного расположения доменов, связывающих углеводные фрагменты, подразделяются на меролектины, гололектины, химеролектины и суперлектины [22].

Гемагглютинины, присоединяясь к моно- или олигосахаридам на поверхности эритроцитов и вызывая их агрегацию, нарушают транспортировку кислорода и распределение питательных веществ в организме человека. Лектины ухудшают всасывание и усвоение питательных нутриентов через связывание с гликозилированными рецепторами на эпителиальных клетках кишечника, что ведет к нарушению целостности эпителия и повышению проницаемости кишечника, а также к развитию воспалительных процессов. Кроме того, данные антипитательные соединения могут подавлять активность пищеварительных ферментов и, как следствие, вызывать расстройство метаболизма белков и углеводов. Результатом связывания углеводов лектинами для организма человека становятся различные нарушения и заболевания: ожирение, хронические воспаления, аутоиммунные реакции и расстройства желудочно-кишечного тракта [9, 23].

Основные источники лектинов растительного происхождения – представители бобовых (фасоль, соя, чечевица, горох и арахис), среди цельнозерновых культур – пшеница, а также некоторые овощи, в частности помидоры, картофель и баклажаны. Количественное содержание лектинов в зернобобовых, например сое, чечевице и фасоли, по данным некоторых исследований, составляет 4,8; 8,0 и 0,7 – 25,3 г/кг соответственно. Наивысшее содержание данных углеводсвязывающих

белков отмечено в красной фасоли, причем употребление в пищу сырых или недостаточно термически обработанных бобов может привести к серьезным токсическим реакциям организма – тошноте, диарее, рвоте и другим нарушениям пищеварительного тракта. Лектины относятся к термолабильным соединениям, поэтому в процессе приготовления при достаточной термической обработке они утрачивают свою активность. Фасоль содержит фитогемагглютинин – белок-лектин, состоящий из двух субъединиц, обеспечивающих агглютинацию лейкоцитов и эритроцитов посредством специфического связывания сложных олигосахаридов [24].

Несмотря на антипитательные свойства лектинов, ряд исследований свидетельствует об их терапевтической полезности при лечении онкологических заболеваний вследствие проявления потенциальной антиангиогенной, антиметастатической и антипролиферативной активностей как *in vitro*, так и *in vivo*. Многие лектины способны избирательно связываться с мембранами раковых клеток или их рецепторами, вызывая цитотоксичность, апоптоз и предотвращение развития опухоли. Таким образом, данные антинутриенты обладают терапевтическим потенциалом для организма человека при соблюдении соответствующих ограничений в дозировке и способе введения [23, 25].

Сапонины. Сапонины – сложные соединения растительного происхождения, обладающие поверхностно-активными свойствами. Они состоят из двух частей: липофильного тритерпенового или стероидного аглика и связанного с ним одного или нескольких гидрофильных углеводных компонентов (моно- или олигосахаридов). Стероидные сапонины включают 27 атомов углерода, а тритерпеновые молекулы – 30 углеродных атомов. Сочетание в одной молекуле липофильного и гидрофильного фрагментов обуславливает поверхностно-активные свойства сапонинов [26].

Данные соединения относят к антипитательным факторам продуктов растительного происхождения из-за отрицательного влияния на биодоступность питательных веществ в организме человека. Сапонины способны препятствовать усвоению жирорастворимых витаминов путем образования нерастворимых комплексов со стеролами в пищеварительном тракте, а также ингибирования активности ферментов, нарушая метаболизм липидов, углеводов и белков. Помимо этого, сапонины оказывают хелатирующее действие на такие микроэлементы, как железо и цинк, что приводит к снижению их всасывания в кишечнике и создает риск развития анемии и дефицита минеральных веществ для живого организма. Эти антинутриенты проявляют гемолитическую активность посредством взаимодействия с холестерином мембран эритроцитов, вызывая при этом их разрушение. Сапонины практически не гидролизуются под действием пищеварительных ферментов человека, а связываются с клетками тонкого кишечника, что приводит к нарушению целостности

и проницаемости эпителиального слоя и появлению токсических эффектов для организма. Особенно указанные негативные воздействия проявляются при попадании соединений в организм в высоких концентрациях [9, 15, 27].

Сапонины содержатся в корнях, листьях, плодах, цветках, околоплодниках и семенах многочисленных семейств растений – как культурных, так и дикорастущих. Основными источниками тритерпеновых сапонинов служат зернобобовые (соя, фасоль, горох, нут, арахис, чечевица), а также их высокие концентрации обнаружены в семенах подсолнечника и киноа, листьях чая, сахарной свеклы и шпината, люпине, женьшене и луке. Стероидные сапонины присутствуют в овсе, спарже, пажитнике, юкке, баклажанах, томатах и батате, их содержание в киноа и амаранте составляет 0,63–69,30 и 0,09–0,49 мг/100 г сухого вещества (СВ) соответственно, их количество варьируется в бобах фасоли, нута и красной чечевицы – 30–585, 150–843 и 370–714 мг/100 г СВ соответственно [2, 20, 28].

Имеются данные о значительном разнообразии биологической активности сапонинов: об их антиоксидантных, антиканцерогенных, противовирусных, противовоспалительных свойствах и гепатопротекторных и кардиопротекторных эффектах. Некоторые сапонины могут использоваться для предотвращения или замедления развития онкологических заболеваний, включая рак молочной железы, легких, толстой кишки и других видов, благодаря способности вызывать апоптоз раковых клеток и подавлять их пролиферации. Отдельные сапонины выступают в качестве иммуностимуляторов: активируют иммунные клетки и усиливают иммунный ответ организма на инфекции. Эти соединения снижают уровень холестерина в крови посредством образования с ним нерастворимых комплексов, что благотворно влияет на сердечно-сосудистую систему, а также проявляют противомикробный эффект в отношении различных патогенов, разрушая мембраны микробных клеток. Наличие поверхностно-активных свойств сапонинов (пенообразования, снижения поверхностного натяжения, мицеллообразования, очистки, смачивания, стабилизации, эмульгирования, солюбилизации и др.) обеспечивает их широкое применение в различных областях, в т. ч. косметической, фармацевтической и пищевой промышленности [27, 29].

Танины. Танины – соединения растительного происхождения, относящиеся к группе полифенолов и обладающие дубильными свойствами с соответствующим вяжущим вкусом. Они подразделяются на два основных класса: гидролизуемые и конденсированные. По химической структуре гидролизуемые дубильные вещества содержат полиольное ядро углевода (обычно глюкозы), частично или полностью этерифицированной фенольными кислотами (галловой или эллаговой). Молекулярная масса этих соединений варьируется в пределах 500–3000 Да, их сложноэфирные связи достаточно легко подвергаются кис-

лотному, щелочному или ферментативному гидролизу. Конденсированные танины (проантоцианидины) – наиболее распространенная группа природных танинов. Это полимеры флаван-3-ольных звеньев (например катехина, эпикатехина), связанных углерод-углеродными связями, что обуславливает их устойчивость к гидролизу. Данные соединения имеют молекулярную массу 1000–20 000 Да. Благодаря полифенольной природе с большим количеством гидроксильных групп танины взаимодействуют с белками, полисахаридами и некоторыми минералами [30, 31].

Антипитательная активность танинов проявляется в их способности образовывать прочные комплексы с полисахаридами и, особенно, с белками. Гидрофобные взаимодействия и водородные связи приводят к формированию агрегатов и осадков. В результате снижается усвоение и всасывание макронутриентов в организме человека и животного. При потреблении продуктов с высокой концентрацией танинов во рту происходит взаимодействие с белками слюны и их осаждение. Таким образом, танины нарушают смазывающие свойства белков, богатых пролином, что усиливает вяжущий, терпкий вкус пищи. Кроме того, дубильные вещества отрицательно влияют на переваривание белков, крахмала и липидов за счет ингибирующего воздействия на активность пищеварительных ферментов, в частности, протеаз, амилазы и липазы. Эти антинутриенты препятствуют усвоению элементов (железо, кальций, цинк) посредством образования дубильно-минеральных комплексов, повышающих риск развития железодефицитной анемии и остеопороза. Согласно исследованиям, чрезмерное потребление танинов вызывает понижение уровня гемоглобина и активности трансферрина в крови, что также свидетельствует о нарушении всасывания минеральных веществ [9, 32, 33].

К достоинствам танинов относится их сильная антиоксидантная активность, которая способствует эффективной нейтрализации свободных радикалов и препятствует пероксидному окислению липидов. В некоторых исследованиях отмечаются противораковые, противовирусные, кардиопротекторные и антимикробные свойства дубильных веществ. Они могут быть полезны в качестве пребиотиков для микроорганизмов кишечника, создавая условия для роста полезных кишечных бактерий или активации их метаболических функций. Имеются сведения о потенциале танинов в терапевтических целях, в частности при снижении риска сердечно-сосудистых заболеваний, а также в регулировании и контроле уровня глюкозы в крови при сахарном диабете [11, 31].

Основными источниками танинов являются напитки (чай, кофе, вино, фруктовые соки), ягоды (гранат, клубника, черника, клюква), орехи (желудь, фундук, миндаль, грецкий орех, пекан, арахис), фрукты (виноград, хурма, айва, яблоки, груши, сливы), травы и специи (гвоздика, корица, тимьян, тмин, ваниль, эстрагон),

а также бобовые культуры. Дубильные вещества присутствуют в листьях, плодах, коре и древесине различных растений: дуб, какао, каштан, черемуха, гранатовое дерево, хурма и др. По различным данным, количественное содержание танинов в побочных продуктах производства чая составляет 5–8 г/100 г СВ. В зависимости от предварительной очистки семян и сорта растений количество конденсированных танинов в бобовых культурах может значительно варьироваться, например в бобах (*Vicia faba* L.) – от 10,9

до 195,0 мг/100 г СВ, нуте – от 21,5 до 175,2 мг/100 г СВ, красной чечевице – от 19,9 до 582,0 мг/100 г СВ [2, 9, 31]. Таким образом, антипитательные вещества обладают двойной функцией (рис.).

Способы снижения антипитательных факторов.

Существуют различные способы обработки растительных культур и продуктов для уменьшения антипитательных веществ до безопасного уровня. К наиболее распространенным традиционным методам относятся замачивание, проращивание, ферментация и различные

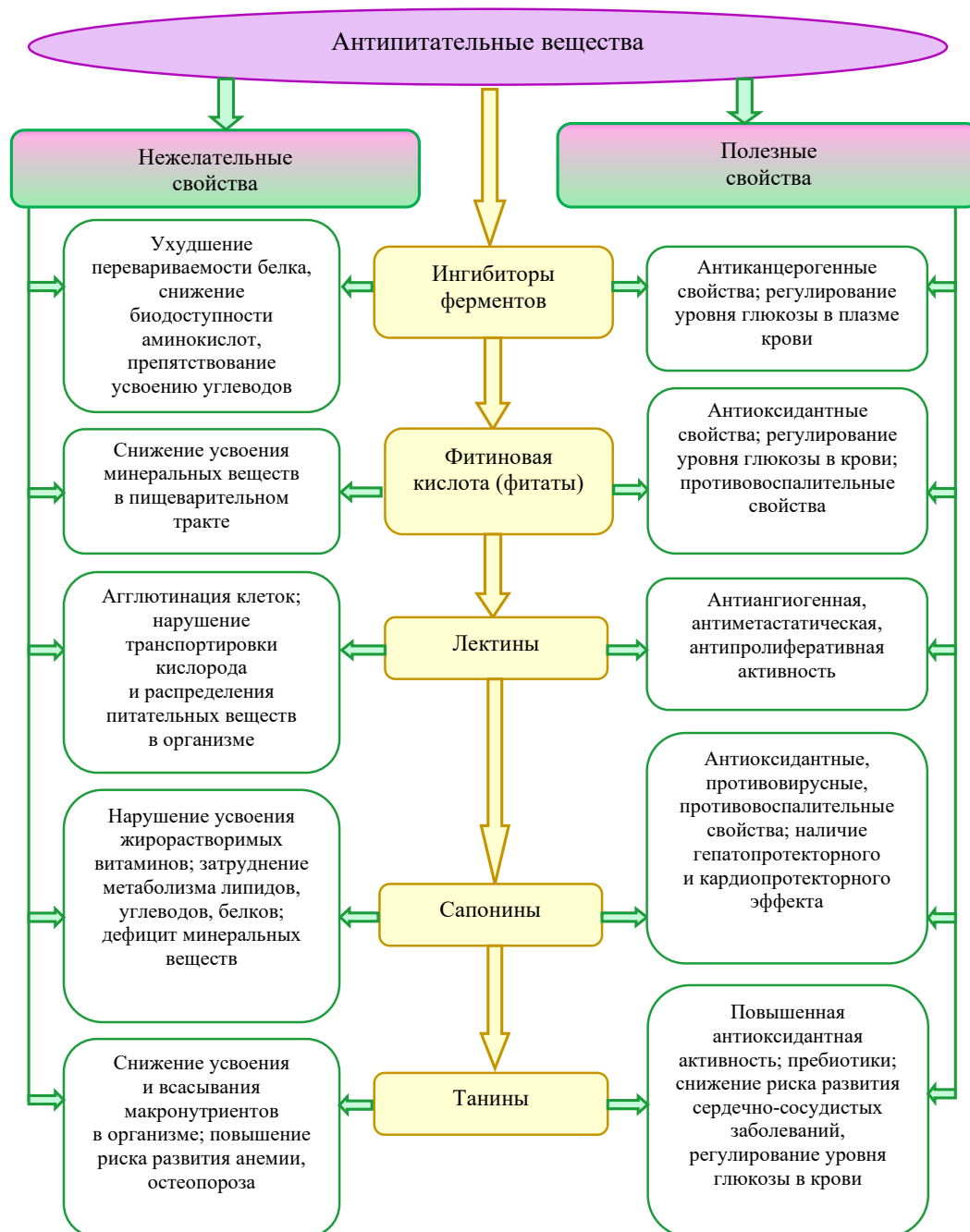


Рисунок. Нежелательные и полезные свойства антинутриентов

Figure. Undesirable and beneficial properties of anti-nutritional substances

виды термической обработки, а также их совместное применение. Современные исследования подтверждают эффективность новых подходов к снижению содержания антинутриентов в растительном сырье: экструзия, ультразвуковая и микроволновая обработка, воздействие высоким гидростатическим давлением и импульсным электрическим полем.

Замачивание. Этот способ позволяет снизить концентрацию антипитательных веществ за счет их перехода в раствор. В процессе замачивания происходит набухание сырья и активация эндогенных ферментов, например фитазы, способствующей расщеплению фитатов. Эффективность указанного процесса зависит от ряда факторов: продолжительности, типа используемой среды (вода, солевые растворы), температуры и pH. Важным фактором является соотношение воды и сырьевого объекта, т. к. при низком соотношении результативность снижается из-за медленной диффузии воды и скорости растворения, а при высоком – увеличивается энергоёмкость процесса [9].

Исследовано влияние замачивания и варки на содержание антипитательных соединений, в частности танинов и фитатов, в красной, белой и черной фасоли. Образцы фасоли обрабатывали в дистиллированной воде в течение 16 ч с последующей сушкой в естественных условиях. Варку предварительно замоченных бобов осуществляли 1 ч. Установлено снижение фитатов и танинов на 12–16 и 23–30 % при замачивании и на 37–38 и 21–41 % при варке [34]. Проведен анализ содержания дубильных веществ в малораспространенных представителях бобовых до и после замачивания в течение 24 ч при уровнях гидратации от 0 до 100 %. Зафиксировано максимальное снижение концентрации танинов на 15,5 % [33]. Набухание в дистиллированной воде в соотношении 1:5 24 ч с последующей сушкой в печи при 40 °C в лимской фасоли (*Phaseolus lunatus* L.) и фасоли адзуки (*Vigna angularis* L.) позволило снизить содержание фитатов, танинов и активность ингибиторов трипсина: в лимской фасоли показатели уменьшились на 11,8; 15,4 и 35,7 % соответственно, в фасоли адзуки – на 25,0; 4,2 и 28,4 % соответственно [35]. Замачивание и проращивание используют в качестве промежуточных этапов обработки продовольственных культур, но для более полного устранения антипитательных факторов рекомендуются комбинации с другими методами [36].

Проращивание. Проращивание считается эффективным методом снижения уровня антинутриентов в продуктах растительного происхождения. В ходе прорастания активируются собственные ферменты (фитазы, пероксидазы, полифенолоксидазы и протеазы), способствующие расщеплению фитатов, окислению фенольных соединений и гидролизу белков. Отмечается, что в пророщенных зернах повышается биодоступность и усвояемость минералов и других питательных веществ. Степень уменьшения концентрации антипитательных соединений при проращивании

зависит от вида сырья, типа антинутриента и условий процесса (температуры, продолжительности и воздействия света) [37, 38].

Проведены исследования влияния проращивания в течение 24 и 48 ч на содержание антипитательных соединений в нуте, чечевице, горохе и маше. Обнаружено, что с увеличением длительности снижается количество фитиновой кислоты и активность ингибиторов трипсина в исследуемых бобовых: на 10,7–75,7 и 4,7–39,2 % соответственно после 48 ч проращивания. Содержание танинов в чечевице уменьшилось в 2,6 раза, в маше – в 5,8 раза, а в горохе повысилось в 1,6 раза, при этом уровень сапонинов значительно увеличился во всех образцах, что может указывать на их концентрирование в большей степени в проростках [39]. Также отмечено снижение концентрации танинов в двух сортах чечевицы в 3,4–4,1 раза после проращивания в течение 8 суток [40]. Зафиксировано эффективное уменьшение танинов и фитиновой кислоты на 27,1–59,9 и 17,4–47,6 % соответственно в замоченных и пророщенных в течение 72 ч образцах амаранта, киноа и гречихи, вместе с тем выявлено повышение содержания в зернах белка, клетчатки, минеральных веществ и антиоксидантной активности [41]. Кроме того, установлено уменьшение содержания фитиновой кислоты в трех сортах киноа и рост фитазной активности через 7 суток после проращивания [42].

Ферментация. Одним из самых распространенных и основных методов, способствующих устранению или минимизации содержания антинутриентов в растительных продуктах, является ферментация. Этот процесс влияет на биохимический состав посредством расщепления микроорганизмами макронутриентов на более простые и биодоступные формы, что повышает усвояемость питательных веществ и пищевую ценность продуктов. Применение метода ферментации позволяет создавать благоприятные условия pH для ферментативного гидролиза антипитательных соединений. Микроорганизмы способны продуцировать фитазы, протеазы, эстеразы и другие ферменты, гидролизующие антинутриенты [36, 43].

Твердофазная ферментация с использованием *Pleurotus ostreatus* в отношении предварительно стерилизованных нута, чечевицы и соевых бобов позволила снизить содержание танинов и фитатов на 25,7–28,8 и 16,0–18,8 % соответственно, а также повысить усвояемость белка и антиоксидантную активность обработанных культур [44]. Анализ влияния ферментации под действием *Lactiplantibacillus plantarum*, ультразвуковой обработки и бланширования на антинутриенты томатов показал эффективность всех перечисленных способов. При этом применение молочнокислых бактерий способствовало наибольшему снижению концентраций антипитательных соединений, в т. ч. фитатов – на 95,8 %, сапонинов – на 89 % [45]. Отмечено значительное снижение антинутриентов на 66–95 % при ферментации шпината с использованием *L. plantarum* [46].

Ферментация молочнокислыми бактериями корма из кукурузной и глютенной муки, а также теста из проса и кукурузы для приготовления эфиопской ферментированной лепешки позволила сократить концентрации фитатов в образцах на 48 и 98 % соответственно [47, 48].

Термическая обработка и ее разновидности.

Существуют различные виды термической обработки растительных продуктов: варка, запекание, автоклавирование, экструзионный нагрев и микроволновая обработка. Эти методы в большей степени влияют на термически нестабильные антинутриенты, такие как ингибиторы ферментов и лектины. Недостатком таких приемов, несмотря на их эффективность и скорость, остается возможное разрушение ценных соединений сырья (например термолабильных витаминов и аминокислот), поэтому необходимо соблюдать оптимальные условия процесса (температурный режим, продолжительность). Автоклавирование – высокоинтенсивный метод обработки с использованием высокой температуры и давления в течение короткого времени. Данный процесс протекает в автоклаве, в которой обрабатываемый объект подвергают воздействию насыщенного пара под давлением 100–200 кПа при температуре 115–130 °С. Экструзионная варка – кратковременный термомеханический способ обработки, сочетающий воздействие температуры, давления и механического сдвига, создаваемый в экструдере. При выходе модифицированного материала из сопла экструдера давление падает, что вызывает эффект вспучивания и влияет на текстуру и состав продукта [49, 50].

При исследовании влияния различных способов обработки на антинутриенты фасоли выявлено, что при замачивании в течение 6 ч и последующем автоклавировании 30 мин при 121 °С достигнуто наибольшее снижение в бобах ингибиторов трипсина (на 96,5 %), гемаггютина (на 74,1 %), фитатов (на 71,6 %) и танинов (на 51,4 %). Обработка в микроволновой печи, ферментация и замачивание совместно с кипячением способствовали уменьшению концентраций указанных антипитательных соединений и повышению усвояемости белка фасоли [51]. Обнаружено, что в процессе автоклавирования в течение 15–20 мин активность ингибиторов трипсина в бобовых культурах снижается на 70–85 %, а при последующей ферментации молочнокислыми бактериями данный показатель увеличивается до 90–95 %. Также сообщается об устранении более 95 % лектинов при кипячении 30 мин чечевицы и черных бобов [36]. Несколько сортов чечевицы были подвержены различным видам обработки для устранения антипитательных факторов, в результате чего наибольшее снижение концентраций ингибиторов трипсина и танинов получено при варке продолжительностью 35 мин предварительно замоченных образцов, а проращивание в большей степени оказало влияние на фитиновую кислоту [52]. При экструдировании двух сортов чечевицы в течение 10–15 с при давлении 3 МПа было достигнуто умень-

шение содержащихся танинов в 1,7–2,5 раза [40]. Сообщается о снижении активности ингибиторов трипсина на 87–96 % в экструдированных продуктах различного рецептурного состава на основе риса и нута по сравнению с необработанными образцами. Экструзию проводили с помощью двухшнекового экструдера при температуре 140 °С 10 мин при скорости вращения шнека 500 об/мин [53]. Экструзионная обработка композитной муки при 130 °С и вращении шнека 150 об/мин привела к уменьшению концентрации фитатов и танинов в полученных образцах [54].

В основе микроволновой обработки лежит объемное термическое воздействие, которое нарушает клеточные мембраны и увеличивает скорость массообмена. Ключевыми параметрами микроволнового нагрева являются уровень мощности и продолжительность обработки. Преимущества данного способа включают высокую скорость нагрева, сокращение времени приготовления, практичность и экономичность обслуживания [55]. При воздействии микроволнового излучения мощностью 500 Вт на протяжении 5 мин на различные сорта фасоли достигнуто снижение концентраций фитатов, танинов и сапонинов на 16–25, 34–40 и 35–42 %, соответственно, причем комбинация с предварительным замачиванием усилила этот эффект [56]. После обработки картофеля микроволнами мощностью 1,1 кВт в течение 2 мин и бланширования при 100 °С содержание антинутриентов снизилось на 76–84 % [57]. Исследовано влияние СВЧ-обработки на активность ингибиторов трипсина и содержание фитиновой кислоты в изоляте горохового белка, а также гидролизатов чечевицы и гороха, результаты показали снижение концентраций данных антипитательных соединений на 43–62 и 30–80 % соответственно [58].

Современные и перспективные методы обработки продуктов. В настоящее время особое внимание заслуживают новые технологии, способные эффективно воздействовать на антинутриенты растительных продуктов посредством молекулярных модификаций, сохраняя при этом безопасность сырья. Ультразвуковое воздействие на пищевые продукты осуществляется с помощью высокочастотных звуковых волн или акустической энергии, влияющих на нековалентные связи макромолекул. Ультразвук в жидкой среде способствует быстрому образованию и схлопыванию кавитационных пузырьков, вызывая колебания температуры, давления и высвобождение энергии. Возникающие сдвиговые усилия могут изменять молекулярную структуру белков и индуцировать гидролитическую активность, при этом отмечается, что ультразвуковая обработка сохраняет питательную ценность продуктов. Обработка высоким гидростатическим давлением (ВГД) – новая технология, воздействующая на межмолекулярные и внутримолекулярные связи в белках и углеводах, что способствует инактивации или снижению концентраций некоторых антипитательных

соединений. ВГД обычно применяют в диапазоне 300–600 МПа непосредственно или через жидкую среду. Обработка импульсным электрическим полем (ИЭП) – инновационная технология, представляющая собой воздействие короткими и мощными импульсами высокого напряжения (до 80 кВ/см) на образцы продуктов, помещенных между двумя электродами. Данный метод основан на эффекте электропорации, при котором электрическое поле повышает проницаемость мембран клеток растительных тканей, что может влиять на активность и количество антипитательных компонентов [37, 59].

В исследовании влияния предварительной обработки (в т. ч. ультразвуком частотой 37 кГц в течение 30 мин) на проращивание гречихи и киноа обнаружено, что содержание фитиновой кислоты уменьшилось на 85,5 % в пророщенной киноа при применении ультразвука [60]. Ультразвуковая обработка с частотой 20 кГц и продолжительностью 26 мин при гидратации проса снизила содержание фитатов и танинов в образцах на 67 и 63 % соответственно [61]. Применение ВГД при 200–400 МПа и ультразвука частотой 20 кГц при экстракции горохового белка способствовало снижению концентраций антинутриентов, при этом в предварительно обработанном ВГД горохе активность ингибиторов трипсина снизилась на 33,5 %, танинов – на 49,8 % [62]. При обработке гороха и фасоли ВГД при 600 МПа было достигнуто уменьшение содержания фитиновой кислоты на 36 и 11 % и повышение усвояемости белка на 4,3 и 8,7 % соответственно, трипсинингибирующая активность в образцах была практически полностью устранена при совместном воздействии давления и повышенной температуры [59]. Сообщается о снижении содержания ингибиторов трипсина на 75,6 % в соевом молоке при воздействии ИЭП при напряжении 40 кВ/см и длительности импульса 2250 мс [9]. Предварительная обработка низкоинтенсивным ИЭП привела к уменьшению концентрации фитиновой кислоты в проросших бобах (*Vicia faba* L.) на 20,4 % [63]. Применение инновационных методов для инактивации антипитательных соединений продуктов растительного происхождения требует дальнейших комплексных исследований.

Выводы

Проведенный анализ зарубежной и отечественной научной литературы показывает, что антипитательные соединения, такие как ингибиторы ферментов, фитаты, лектины, танины и сапонины являются неотъемлемыми

компонентами растительного сырья, оказывающими значительное влияние на пищевую ценность продуктов, преимущественно снижая биодоступность макро- и микроэлементов.

Вместе с тем, современные исследования указывают на потенциальное положительное физиологическое воздействие антинутриентов (антиоксидантное, антиканцерогенное, гипогликемическое) при их контролируемом потреблении, что подтверждает необходимость дифференциального подхода к оценке этих веществ.

Наиболее эффективными и широко применяемыми способами снижения содержания антипитательных факторов остаются традиционные методы, включающие замачивание, проращивание, ферментацию и термическую обработку (особенно автоклавирование). Их комбинирование позволяет добиться синергетического эффекта. Перспективными направлениями выступают инновационные технологии обработки – ультразвуковая, обработка высоким гидростатическим давлением и импульсным электрическим полем. Эти методы способствуют не только эффективной инактивации антинутриентов, но и минимизации потерь термочувствительных питательных веществ.

Таким образом, оптимизация пищевой ценности растительных продуктов должна базироваться на научно обоснованном выборе и комбинации приемов обработки, учитывающих специфику сырья, тип антипитательных соединений и необходимость сохранения биологически активных компонентов. Необходимы дальнейшие комплексные исследования, направленные на изучение молекулярных механизмов модификации антинутриентов при обработке, а также на оценку влияния полученных продуктов на здоровье человека.

Критерии авторства

Авторы в равной степени участвовали в подготовке и написании статьи.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution

The authors contributed equally to the research and share first authorship.

Conflict of interest

The authors state that there is no conflict of interest.

Список литературы / References

1. Боков Д. О., Богачук М. Н., Малинкин А. Д., Назарова В. А., Бессонов В. В. Оценка взаимодействия полисахаридов и минорных биологически активных веществ в функциональных пищевых ингредиентах растительного происхождения. Вопросы питания. 2023. Т. 92. № 1. С. 108–115. [Bokov DO, Bogachuk MN, Malinkin AD, Nazarova VA, Bessonov VV. Interaction assessment of polysaccharides and minor bioactive compounds in functional food ingredients of plant origin. Problems of Nutrition. 2023;92(1):108–115. (In Russ.)] <https://doi.org/10.33029/0042-8833-2023-92-1-108-115>

2. Han R, Wang Y, Yang Z, Micklethwaite S, Mondor M, *et al.* Industrial-scale fractionation of fava bean, chickpea, and red lentil: A comparative analysis of composition, antinutrients, nutrition, structure, and functionality. *Current Research in Food Science*. 2025;11:101152. <https://doi.org/10.1016/j.crfs.2025.101152>
3. Affrifah NS, Uebersax MA, Amin S. Nutritional significance, value-added applications, and consumer perceptions of food legumes: A review. *Legume Science*. 2023;5(4):e192. <https://doi.org/10.1002/leg3.192>
4. Didinger C, Thompson HJ. The role of pulses in improving human health: A review. *Legume Science*. 2022;4(4):e147. <https://doi.org/10.1002/leg3.147>
5. Samtiya M, Aluko RE, Dhewa T. Plant food anti-nutritional factors and their reduction strategies: An overview. *Food Production, Processing and Nutrition*. 2020;2:6. <https://doi.org/10.1186/s43014-020-0020-5>
6. Костюченко М. Н., Тагиев Н. Ш., Савкина О. А. Пищевая ценность и антипитательные факторы цельнозерновых ингредиентов для производства хлебобулочных изделий. *Хлебопродукты*. 2023. № 7. С. 36–40. [Kostyuchenko MN, Tagiev NSH, Savkina OA. Nutritional value and anti-nutritional factors of whole grain ingredients for the production in bakery products. *Bakery Products*. 2023;(7):36–40. (In Russ.)] <https://doi.org/10.32462/0235-2508-2023-32-7-36-40>
7. Acquah C, Ohemeng-Boahen G, Power KA, Tosh SM. The effect of processing on bioactive compounds and nutritional qualities of pulses in meeting the sustainable development goal 2. *Frontiers in Sustainable Food Systems*. 2021;5:681662. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.681662>
8. Ахангаран М., Афанасьев Д. А., Чернуха И. М., Машенцева Н. Г., Гаравири М. Биоактивные пептиды и антипитательные вещества нута: характеристика и свойства (обзор). *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2022. Т. 183. № 1. С. 214–223. [Akhangan M, Afanas'ev DA, Chernukha IM, Mashentseva NG, Garaviri M. Bioactive peptides and antinutrients in chickpea: description and properties (a review). *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2022;183(1):214–223. (In Russ.)] <https://doi.org/10.30901/2227-8834-2022-1-214-223>
9. Kheto A, Choudhury DB, Sarkhel S, Sarkar A, Kumar Y. Anti-nutritional factors: Nutrient interactions, processing interventions, and health aspects. *Food Chemistry*. 2025;496:146746. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2025.146746>
10. Das G, Sharma A, Sarkar PK. Conventional and emerging processing techniques for the post-harvest reduction of antinutrients in edible legumes. *Applied Food Research*. 2022;2(1):100112. <https://doi.org/10.1016/j.afres.2022.100112>
11. Salim R, Nehvi IB, Mir RA, Tyagi A, Ali S, *et al.* A review on anti-nutritional factors: Unraveling the natural gateways to human health. *Frontiers in Nutrition*. 2023;10:1215873. <https://doi.org/10.3389/fnut.2023.1215873>
12. Manzanilla-Valdez ML, Ma Z, Mondor M, Hernández-Álvarez AJ. Decoding the duality of antinutrients: Assessing the impact of protein extraction methods on plant-based protein sources. *Journal of agricultural and food Chemistry*. 2024;72(22):12319–12339. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.4c00380>
13. Luo Z, Zhu Y, Xiang H, Wang Z, Jiang Z, *et al.* Guo Advancements in inactivation of soybean trypsin inhibitors. *Foods*. 2025;14(6):975. <https://doi.org/10.3390/foods14060975>
14. Shi L, Mu K, Arntfield SD, Nickerson MT. Changes in levels of enzyme inhibitors during soaking and cooking for pulses available in Canada. *Journal of Food Science and Technology*. 2017;54(4):1014–1022. <https://doi.org/10.1007/s13197-017-2519-6>
15. Nath H, Samtiya M, Dhewa T. Beneficial attributes and adverse effects of major plant-based foods anti-nutrients on health: A review. *Human Nutrition & Metabolism*. 2022;28:200147. <https://doi.org/10.1016/j.hnm.2022.200147>
16. Cheng S, Langrish TAG. A review of the treatments to reduce anti-nutritional factors and fluidized bed drying of pulses. *Foods*. 2025;14(4):681. <https://doi.org/10.3390/foods14040681>
17. Lin Q, Qiu C, Li X, Sang S, McClements DJ, *et al.* The inhibitory mechanism of amylase inhibitors and research progress in nanoparticle-based inhibitors. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2022;63(33):12126–12135. <https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2098687>
18. Brouns F. Phytic acid and whole grains for health controversy. *Nutrients*. 2021;14(1):25. <https://doi.org/10.3390/nut14010025>
19. Chondrou T, Adamidi N, Lygouras D, Hirota SA, Androutsos O, *et al.* Dietary phytic acid, dephytinization, and phytase supplementation alter trace element bioavailability—a narrative review of human interventions. *Nutrients*. 2024;16(23):4069. <https://doi.org/10.3390/nut16234069>
20. Singh P, Pandey VK, Sultan Z, Singh R, Dar AH. Classification, benefits, and applications of various anti-nutritional factors present in edible crops. *Journal of Agriculture and Food Research*. 2023;14:100902. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100902>
21. Feizollahi E, Mirmahdi RS, Zoghi A, Zijlstra RT, Roopesh MS, *et al.* Review of the beneficial and anti-nutritional qualities of phytic acid, and procedures for removing it from food products. *Food Research International*. 2021;143:110284. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2021.110284>
22. Naithani S, Komath SS, Nonomura A, Govindjee G. Plant lectins and their many roles: Carbohydrate-binding and beyond. *Journal of Plant Physiology*. 2021;266:153531. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2021.153531>
23. López-Moreno M, Garcés-Rimón M, Miguel M. Antinutrients: Lectins, goitrogens, phytates and oxalates, friends or foe? *Journal of Functional Foods*. 2022;89:104938. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2022.104938>

24. Duraiswamy A, Sneha A NM, Jebakani K S, Selvaraj S, Pramitha J L, *et al.* Genetic manipulation of anti-nutritional factors in major crops for a sustainable diet in future. *Frontiers in Plant Science*. 2023;13:1070398. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1070398>
25. Mazalovska M, Kouokam JC. Plant-derived lectins as potential cancer therapeutics and diagnostic tools. *BioMed Research International*. 2020;2020:1631394. <https://doi.org/10.1155/2020/1631394>
26. Timilsena YP, Phosanam A, Stockmann R. Perspectives on saponins: Food functionality and applications. *International Journal of Molecular Sciences*. 2023;24(17):13538. <https://doi.org/10.3390/ijms241713538>
27. Sharma K, Kaur R, Kumar S, Saini RK, Sharma S, *et al.* Saponins: A concise review on food related aspects, applications and health implications. *Food Chemistry Advances*. 2023;2:100191. <https://doi.org/10.1016/j.focha.2023.100191>
28. Jan N, Hussain SZ, Naseer B, Bhat TA. Amaranth and quinoa as potential nutraceuticals: A review of anti-nutritional factors, health benefits and their applications in food, medicinal and cosmetic sectors. *Food Chemistry: X*. 2023;18:100687. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2023.100687>
29. White CS, Dilger RN. Immunomodulatory potential of dietary soybean-derived saponins. *Journal of Animal Science*. 2024;102:349. <https://doi.org/10.1093/jas/skac349>
30. Melo LFM, Aquino-Martins VGQ, Silva APD, Oliveira Rocha HA, Scortecchi KC. Biological and pharmacological aspects of tannins and potential biotechnological applications. *Food Chemistry*. 2023;414:135645. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.135645>
31. Cosme F, Aires A, Pinto T, Oliveira I, Vilela A, *et al.* A comprehensive review of bioactive tannins in foods and beverages: functional properties, health benefits, and sensory qualities. *Molecules*. 2025;30(4):800. <https://doi.org/10.3390/molecules30040800>
32. Molino S, Pilar Francino M, Rufián Henares MÁ. Why is it important to understand the nature and chemistry of tannins to exploit their potential as nutraceuticals? *Food Research International*. 2023;173:113329. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.113329>
33. Ojo MA. Tannins in foods: nutritional implications and processing effects of hydrothermal techniques on underutilized hard-to-cook legume seeds-a review. *Preventive Nutrition and Food Science*. 2022;27(1):14–19. <https://doi.org/10.3746/pnf.2022.27.1.14>
34. Abera S, Yohannes W, Chandravanshi BS. Effect of processing methods on antinutritional factors (oxalate, phytate, and tannin) and their interaction with minerals (calcium, iron, and zinc) in red, white, and black kidney beans. *International Journal of Analytical Chemistry*. 2023;2023:6762027. <https://doi.org/10.1155/2023/6762027>
35. Rizvi QUEH, Guiné RPF, Ahmed N, Sheikh MA, Sharma P, *et al.* Kumar Effects of soaking and germination treatments on the nutritional, anti-nutritional, and bioactive characteristics of adzuki beans (*Vigna angularis* L.) and lima beans (*Phaseolus lunatus* L.). *Foods*. 2024;13(9):1422. <https://doi.org/10.3390/foods13091422>
36. Ким А. А., Баланов П. Е., Смотряева И. В. Влияние ферментации бобовых на снижение антипитательного фактора. Обзор. Пищевые системы. 2025. Т. 8. № 3. С. 401–406. [Kim AA, Balanov PE, Smotraeva IV. Effect of legume fermentation on the reduction of the anti-nutritional factor. Review. Food Systems. 2025;8(3):401–406. (In Russ.)] <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-3-401-406>
37. Das R, Islam M, Mahajan P, Kaur R, Gaur S, *et al.* Emerging non-thermal technologies for reducing anti-nutritional factors in food systems: A systematic review. *Journal of Food Science*. 2025;90(12):e70781. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.70781>
38. Антипова Л. В., Ибрагимова О. Т., Плотников В. Е., Плотникова И. В. Изменение химического состава высокобелковых бобовых культур при проращивании и технологические возможности их применения в функциональных пищевых системах. Вестник ВГУИТ. 2025. Т. 87. № 3. С. 56–65. [Antipova LV, Ibragimova OT, Plotnikov VE, Plotnikova IV. Changes in the chemical composition of high-protein legumes during germination and technological possibilities of their application in functional food systems. Proceedings of VSUET. 2025;87(3):56–65. (In Russ.)] <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2025-3-56-65>
39. Yılmaz Tuncel N, Polat Kaya H, Sakarya FB, Andaç AE, Korkmaz F, *et al.* The effect of germination on antinutritional components, in vitro starch and protein digestibility, content, and bioaccessibility of phenolics and antioxidants of some pulses. *Food Science & Nutrition*. 2025;13(5):e70103. <https://doi.org/10.1002/fsn3.70103>
40. Плотников В. Е., Магомедов М. Г., Суханов П. Т., Плотникова И. В., Полянский К. К. и др. Антипитательные факторы зернобобовых культур: качественный и количественный анализ танинов в чечевице и продуктах ее переработки. Вестник ВГУИТ. 2025. Т. 87. № 3. С. 141–152. [Plotnikov VE, Magomedov MG, Sukhanov PT, Plotnikova IV, Polyanskiy KK, *et al.* Anti-nutritional factors of leguminous crops: Qualitative and quantitative analysis of tannins in lentils and their processed products. Proceedings of VSUET. 2025;87(3):141–152. (In Russ.)] <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2025-3-141-152>
41. Thakur P, Kumar K, Ahmed N, Chauhan D, Eain Hyder Rizvi QU, *et al.* Effect of soaking and germination treatments on nutritional, anti-nutritional, and bioactive properties of amaranth (*Amaranthus hypochondriacus* L.), quinoa (*Chenopodium quinoa* L.), and buckwheat (*Fagopyrum esculentum* L.). *Current Research in Food Science*. 2021;4:917–925. <https://doi.org/10.1016/j.crfs.2021.11.019>

42. Maldonado-Alvarado P, Pavón-Vargas DJ, Abarca-Robles J, Valencia-Chamorro S, Haros CM. Effect of germination on the nutritional properties, phytic acid content, and phytase activity of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd). Foods. 2023;(2):389. <https://doi.org/10.3390/foods12020389>
43. Emkani M, Oliete B, Saurel R. Effect of lactic acid fermentation on legume protein properties, a review. Fermentation. 2022;8:244. <https://doi.org/10.3390/fermentation8060244>
44. Noori SMA, Hojjati M, Sorourian R. Enhancing nutritional quality and functionality of legumes: Application of solid-state fermentation with *Pleurotus ostreatus*. Food Science & Nutrition. 2025;13:e70783. <https://doi.org/10.1002/fsn3.70783>
45. Ayub AR, Waseem M, Ahmad Z, Alshammari JM, Ismail T, et al. Probing the effect of ultrasonication, probiotic lacto-fermentation, and blanching on bioactive compounds, antioxidants activities, and antinutrients of tomato. Food Science & Nutrition. 2025;13:e70970. <https://doi.org/10.1002/fsn3.70970>
46. Naseem A, Akhtar S, Ismail T, Qamar M, Sattar D. Effect of growth stages and lactic acid fermentation on anti-nutrients and nutritional attributes of spinach (*Spinacia oleracea*). Microorganisms. 2023;11:2343. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11092343>
47. Sun X, Ma L, Xuan Y, Liang J. Degradation of anti-nutritional factors in maize gluten feed by fermentation with *Bacillus subtilis*: A focused study on optimizing fermentation conditions. Fermentation. 2024;10:555. <https://doi.org/10.3390/fermentation10110555>
48. Yehuala TF, Atlabachew M, Aslam MF, Allen L, Griffith H, et al. Fermentation kinetics and changes in levels of antinutrients in pearl millet and pearl millet-maize composite dough recipes used to prepare *Injera*. Science & Nutrition. 2025;13(7):e70598. <https://doi.org/10.1002/fsn3.70598>
49. Avilés-Gaxiola S, Chuck-Hernández C, Serna SO. Inactivation methods of trypsin inhibitor in legumes: A review. Journal of Food Science. 2018;83(1):17–29. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.13985>
50. Pedrosa MM, Guillamón E, Arribas C. Autoclaved and extruded legumes as a source of bioactive phytochemicals: A review. Foods. 2021;10:379. <https://doi.org/10.3390/foods10020379>
51. Arise AK, Malomo SA, Cynthia CI, Aliyu NA, Arise RO. Influence of processing methods on the antinutrients, morphology and *in-vitro* protein digestibility of jack bean. Food Chemistry Advances. 2022;1:100078. <https://doi.org/10.1016/j.focha.2022.100078>
52. Liberal Â, Fernandes A, Ferreira ICFR, Vivar-Quintana AM, Barros L. Effect of different physical pre-treatments on physicochemical and techno-functional properties, and on the antinutritional factors of lentils (*Lens culinaris* spp). Food Chemistry. 2024;450:139293. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.139293>
53. Ciudad-Mulero M, Vega EN, García-Herrera P, Fernández-Tomé S, Pedrosa MM. New gluten-free extruded snack-type products based on rice and chickpea and fortified with passion fruit skin: Extrusion cooking effect on phenolic composition, non-nutritional factors, and antioxidant properties. Molecules. 2025;30(6):1225. <https://doi.org/10.3390/molecules30061225>
54. Duguma HT, Forsido SF, Belachew T, Hense O. Changes in anti-nutritional factors and functional properties of extruded composite flour. Frontiers in Sustainable Food Systems. 2021;5:713701. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.713701>
55. Badjona A, Bradshaw R, Millman C, Howarth M, Dubey B. Faba bean processing: Thermal and non-thermal processing on chemical, antinutritional factors, and pharmacological properties. Molecules. 2023;28(14):5431. <https://doi.org/10.3390/molecules28145431>
56. Yu S, Zhang Yu, Zhang Y, Zhang CH, Liu X, et al. Water-assisted microwave processing: Rapid detoxification and antioxidant enhancement in colored kidney beans. Foods. 2025;14(20):3557. <https://doi.org/10.3390/foods14203557>
57. Waseem M, Akhtar S, Ismail T, Alsulami T, Qamar M, et al. Effect of thermal and non-thermal processing on Technofunctional, nutritional, safety and sensorial attributes of potato powder. Food Chemistry: X. 2024;24:101896. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2024.101896>
58. Рождественская Л. Н., Чугунова О. В. Разработка технических решений по снижению антипитательных веществ бобового сырья. Индустрия питания. 2025. Т. 10. № 2. С. 33–45. [Rozhdestvenskaya LN, Chugunova OV. Development of technical solutions to reduce anti-nutritional substances in legume raw materials. Food Technology. 2025;10(2):33–45. (In Russ.)] <https://doi.org/10.29141/2500-1922-2025-10-2-4>
59. Ohanenye IC, Ekezie FC, Sarteshnizi RA, Boachie RT, Emenike CU. Legume seed protein digestibility as influenced by traditional and emerging physical processing technologies. Foods. 2022;11(15):2299. <https://doi.org/10.3390/foods11152299>
60. Altıkardeş E, Güzel N. Impact of germination pre-treatments on buckwheat and Quinoa: Mitigation of anti-nutrient content and enhancement of antioxidant properties. Food Chemistry: X. 2024;21:101182. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2024.101182>
61. Yadav S, Mishra S, Pradhan RC. Ultrasound-assisted hydration of finger millet (*Eleusine Coracana*) and its effects on starch isolates and antinutrients. Ultrasonics sonochemistry. 2021;73:105542. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2021.105542>

62. Dong G, Hu Z, Tang J, Das RS, Sun DW, *et al.* Reducing anti-nutritional factors in pea protein using advanced hydrodynamic cavitation, ultrasonication, and high-pressure processing technologies. Food Chemistry. 2025;488:144834. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2025.144834>
63. Johnston C, Leong SY, Teape C, Liesaputra V, Oey I. Low-intensity pulsed electric field processing prior to germination improves *in vitro* digestibility of faba bean (*Vicia faba* L.) flour and its derived products: A case study on legume-enriched wheat bread. Food Chemistry. 2024;449:139321. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.139321>

Дополнительная информация об авторах / Additional information about the authors

Алёхина Надежда Николаевна / Nadezhda N. Alekhina ORCID 0000-0002-3317-9858; eLIBRARY SPIN 3412-6635
Антипова Людмила Васильевна / Ludmila V. Antipova ORCID 0000-0002-1416-0297; eLIBRARY SPIN 7423-3405
Лобанов Владимир Григорьевич / Vladimir G. Lobanov ORCID 0000-0003-2838-3253; eLIBRARY SPIN 8017-9952
Пономарева Елена Ивановна / Elena I. Ponomareva ORCID 0000-0003-2310-2838; eLIBRARY SPIN 5848-5870
Нартова Валерия Николаевна / Valeria N. Nartova ORCID 0009-0007-4589-6428; eLIBRARY SPIN 7847-0403

<https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-2-2641>
<https://elibrary.ru/RJKTKK>

Оригинальная статья
<https://fptt.ru>

Изучение свойств штаммов *Streptococcus thermophilus* и конструирование микробных консорциумов с их участием



С. А. Кишилова^{ORCID}, В. А. Леонова^{ORCID}, В. А. Митрова^{ORCID},
В. А. Семенова^{ORCID}, Н. С. Пряничникова^{ORCID}, В. К. Семипятный^{ORCID},
И. В. Рожкова^{*ORCID}, А. Г. Галстян^{ORCID}

Всероссийский научно-исследовательский институт молочной промышленности^{ROR}, Москва, Россия

Поступила в редакцию: 24.02.2026

Принята после рецензирования: 17.04.2026

Принята к публикации: 05.05.2026

*e-mail: i_rozhkova@vniimi.org

© С. А. Кишилова, В. А. Леонова, В. А. Митрова,
В. А. Семенова, Н. С. Пряничникова, В. К. Семипятный,
И. В. Рожкова, А. Г. Галстян, 2026



Аннотация.

Streptococcus thermophilus – вторая по важности культура в производстве молочнокислой продукции после *Lactococcus lactis* subsp. *lactis*. При создании консорциумов естественное внутривидовое разнообразие *S. thermophilus* является перспективным источником в области создания ферментированных продуктов, обогащенных полезными для организма человека компонентами. Цель исследования – изучить свойства коллекционных штаммов *S. thermophilus* для создания на их основе консорциумов с прогнозируемыми свойствами.

Объекты исследования – штаммы *S. thermophilus* из коллекции ФГАНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт молочной промышленности» (Москва, Россия), а также микробные консорциумы с их участием. В работе применяли микробиологические, биохимические и физико-химические методы и протеомный анализ. В экспериментальных образцах определяли содержание органических кислот, витаминов и ферментативную активность.

Максимальное содержание молочной кислоты у изученных штаммов *S. thermophilus* составило 6643,5 мг/кг. Способность синтезировать витамины В₂ и В₉ зависела от штамма. Высокий уровень β-галактозидазы выявлен у большинства культур. Для штаммов *S. thermophilus* проведен протеомный анализ, на основе которого сконструирована матрица функционального распределения белков. Ряд метаболических категорий продемонстрировал выраженную штамм-специфичность. Для создания микробных консорциумов с прогнозируемыми свойствами изучена биосовместимость экспериментальных штаммов с представителями пробиотических культур. На основе полученных данных сконструированы варианты микробных консорциумов с участием исследованных штаммов *S. thermophilus*. Образцы описаны по органолептическим показателям, активности сквашивания, титруемой и активной кислотности, условной вязкости.

В исследовании подробно охарактеризованы штаммы *S. thermophilus* для создания многоштаммовых консорциумов и сконструированы 18 ассоциаций, из которых по производственно значимым характеристикам отобраны 9 перспективных вариантов.

Ключевые слова. *Streptococcus thermophilus*, кисломолочные продукты, микробные консорциумы, производственно значимые свойства, протеомный анализ, заквасочные микроорганизмы, биологическая совместимость

Финансирование. Работа выполнена в рамках Государственного задания FNSS-2025-0004.

Для цитирования: Кишилова С. А., Леонова В. А., Митрова В. А., Семенова В. А., Пряничникова Н. С. и др. Изучение свойств штаммов *Streptococcus thermophilus* и конструирование микробных консорциумов с их участием. Техника и технология пищевых производств. 2026. Т. 56. № 2. С. 342–353. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-2-2641>

***Streptococcus thermophilus* Strains: Properties and Microbial Consortia**



**Svetlana A. Kishilova^{ID}, Victoria A. Leonova^{ID}, Vera A. Mitrova^{ID},
Victoria A. Semenova^{ID}, Nataliya S. Pryanichnikova^{ID},
Vladislav K. Semipyatniy^{ID}, Irina V. Rozhkova^{*ID}, Aram G. Galstyan^{ID}**

All-Russian Dairy Research Institute^{ROR}, Moscow, Russia

Received: 24.02.2026
Revised: 17.04.2026
Accepted: 05.05.2026

*e-mail: i_rozhkova@vnimi.org
© S.A. Kishilova, V.A. Leonova, V.A. Mitrova, V.A. Semenova,
N.S. Pryanichnikova, V.K. Semipyatniy, I.V. Rozhkova,
A.G. Galstyan, 2026



Abstract.

Lactic acid strains require a comprehensive analysis prior to their use in new consortia with valuable production properties. *Streptococcus thermophilus* can be considered the second most important culture after *Lactococcus lactis* subsp. *lactis*. The natural intraspecific diversity of *S. thermophilus* makes it a promising consortium component for functional fermented products.

This study investigated *S. thermophilus* strains (All-Russian Dairy Research Institute, Moscow, Russia) and their consortia using microbiological, biochemical, physicochemical, and proteomic methods. The *S. thermophilus* strains were tested for organic acids, vitamins, and enzymatic activity.

The highest lactic acid content recorded was 6,643.5 mg/kg while the ability to synthesize vitamins B₂ and B₉ was strain-dependent. The cultures were rich in β -galactosidase. A proteomic analysis was performed to construct a matrix of functional protein distribution, revealing that several metabolic categories demonstrated pronounced strain specificity. To create microbial consortia with predictable properties, the strains were tested for biocompatibility with various probiotic cultures. The resulting data were used to design variants of microbial consortia, which were evaluated for sensory properties, fermentation activity, titratable and active acidity, and relative viscosity.

The most promising *S. thermophilus* strains were incorporated into 18 multistrain consortia, nine of which demonstrated superior production-related characteristics.

Keywords. *Streptococcus thermophilus*, fermented milk products, microbial consortia, technologically valuable properties, starter microorganisms, biological compatibility

Funding. The work was carried out as part of the State Task FNSS-2025-0004.

For citation: Kishilova SA, Leonova VA, Mitrova VA, Semenova VA, Pryanichnikova NS, et al. *Streptococcus thermophilus* Strains: Properties and Microbial Consortia. Food Processing: Techniques and Technology. 2026;56(2):342–353. (In Russ.) <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-2-2641>

Введение

Молочные продукты имеют стратегическое значение для экономической безопасности страны [1]. Развитие производства качественной и конкурентной продукции невозможно без сохранения и пополнения фондов отечественных коллекций микроорганизмов с ценными функциональными свойствами и высоким потенциалом для изготовления заквасок [2, 3]. В рамках обеспечения продовольственной безопасности Российской Федерации на период до 2036 г. актуально развитие отечественных технологий производства заквасочных культур, являющихся основой для изготовления широкого спектра молочных продуктов.

Характеристики продукта зависят от микроорганизмов, осуществляющих ферментацию, и от образуемых

ими продуктов метаболизма. Способность бактерии *Streptococcus thermophilus* преобразовывать лактозу в молочную кислоту при повышенных температурах широко используется в молочной промышленности. Этот вид можно считать вторым по важности микроорганизмом после *Lactococcus lactis* subsp. *lactis*. Термофильный стрептококк включают в состав заквасок для производства йогурта, мацони, ряженки, варенца и сыров типа моцарелла. История его применения насчитывает столетия – вероятно с тех пор, как люди впервые занялись молочным хозяйством [4]. Активные штаммы *S. thermophilus* сквашивают молоко за 3,5–4 ч при оптимальной температуре, при этом предельная кислотность в молоке не превышает 100–115 °Т [5]. Некоторые штаммы образуют диацетил и синтезируют

экзополисахариды (ЭПС), в основном состоящие из галактозы, глюкозы и рамнозы в разных соотношениях. Способность продуцировать ЭПС особенно важна для производства йогурта, обеспечивая вязкую текстуру продукта [6].

Протеолитическая система *S. thermophilus* включает более 20 ферментов и способна расщеплять казеин – ключевой предшественник вкусовых соединений. Фракции казеина (α -, β -, κ -) вносят неоднородный вклад в формирование вкусовых характеристик конечного продукта, что учитывается при разработке технологических процессов [7, 8].

S. thermophilus отличается от других видов молочнокислых бактерий способностью удовлетворять потребности в аминокислотах при росте в молоке без внешних добавок. Микроорганизм получает их как за счет собственной биосинтетической системы, так и при взаимодействии с другими видами бактерий, входящих в ассоциацию [4].

Штаммы *S. thermophilus* вырабатывают соединения, обладающие противовоспалительными, антиоксидантными, антимуtagenными и иммуностимулирующими свойствами [9]. К ним относятся жирные кислоты с короткой цепью, конъюгированная линолевая кислота, экзополисахариды, γ -аминомасляная кислота и другие вещества, оказывающие общеоздоровительный эффект на человека [10]. *S. thermophilus* обладает штамм-специфической способностью продуцировать фолиевую кислоту – важный метаболит для нормального функционирования человеческого организма –, увеличивая ее содержание в молоке при ферментации примерно в 6 раз [11]. У промышленно значимых штаммов данное свойство имеет большую вариабельность. При создании консорциумов использование естественного внутривидового разнообразия *S. thermophilus* может служить перспективным инструментом для получения ферментированных продуктов, обогащенных полезными для здоровья компонентами. Во многих странах уделяют особое внимание поиску пробиотических штаммов, способных активно развиваться при совместном культивировании, усиливая свои биологические, пробиотические и технологические качества.

Проведено изучение и отбор штаммов *S. thermophilus* из коллекции ФГАНУ «ВНИМИ» (Москва, Россия), обладающих перспективными производственно ценными технологическими параметрами и высокой стабильностью при хранении [12].

Цель исследования – изучить свойства коллекционных штаммов *S. thermophilus* для создания на их основе консорциумов с прогнозируемыми свойствами.

Объекты и методы исследования

Объекты исследования – культуры *Streptococcus thermophilus* из коллекции ФГАНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт молочной промышленности» (Москва, Россия): штаммы 154, 132, 12В, 15т, 16т, С1, 6КВ, отобранные при изучении про-

изводственно значимых характеристик [12], а также микробные консорциумы с их участием. Для оценки их потенциала использованы комплексные методы, включая микробиологический метод и протеомный анализ, а также современные биохимические и физико-химические подходы. При составлении консорциумов привлекали коллекционные штаммы лактобацилл с известными свойствами: *Lactobacillus acidophilus* C2, *Lb. helveticus* 100АШ, *Lb. helveticus* 18а, *Lb. bulgaricus* Lb100 и пробиотический штамм *Bifidobacterium adolescentis* (*B. longum*) МС-42. Для культивирования молочнокислых бактерий применяли стерильное обезжиренное молоко марки «Стандарт» (Республика Беларусь). *B. adolescentis* МС-42 культивировали на среде ГМК-2 (Углич, Россия). Для получения экспериментальных образцов использовали стерильное обезжиренное молоко, сквашенное исследуемыми штаммами и консорциумами с их участием. Органолептические характеристики продуктов, полученных на основе разработанных консорциумов, оценивали с применением молока, которое пастеризовали при температуре 95 ± 2 °С в течение 20 мин.

Активность сквашивания определяли в соответствии с «Методическими рекомендациями по организации микробиологического контроля на предприятиях цельномолочной и молочно-консервной промышленности» № 12253 от 26.02.2009. В 100 см³ пастеризованного молока вносили 3–5 % исследуемого консорциума и инкубировали при температуре 37 ± 2 °С. Период сквашивания фиксировали визуально.

Органолептическую оценку образцов проводили по стандартизованному описательному методу с использованием унифицированных дескрипторов в соответствии с ГОСТ Р ИСО 22935-2-2011 (пункт 13).

Ферментативную активность определяли с помощью тест-систем API ZYM (BioMérieux, Франция), которые позволяют проводить полуколичественное измерение активности ферментов. Результаты оценивали согласно инструкции производителя.

Содержание органических кислот в экспериментальных образцах, предварительно разбавленных дистиллированной водой, устанавливали методом капиллярного электрофореза на приборе Капель-205 (Санкт-Петербург, Россия), оборудованном спектрофотометрическим детектором и кварцевым капилляром (внутренний диаметр 75 мкм, общая длина – 60 см). Буферный электролит готовили на основе бензойной кислоты, диэтаноламина, цетилтриметиламмония бромида и трилона Б. Разделение осуществляли при напряжении 20 кВ и ультрафиолетовом детектировании при 254 нм. Электрофореграммы обрабатывали с помощью программного обеспечения Эльфоран.

Витамины группы В выявляли с помощью высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ) на высокоэффективном жидкостном хроматографе Agilent 1260 Infinity II в сочетании с масс-спектрометром Ultivo Triple Quad LC/MS 6465 (Agilent Technologies,

Сингапур), а также на Agilent 1260 Infinity II с диодно-матричным детектором G7115A. Разделение выполняли на колонке Agilent InfinityLab 120 Poroshell 120 Phenyl-Hexyl (3,0×100 мм; 2,7 мкм). Витамин А также определяли методом ВЭЖХ. Используемые стандарты представлены в таблице 1.

Содержание витамина С оценивали на хроматографической системе Agilent 1260, оснащенной градиентным 4-канальным насосом, диодно-матричным детектором, термостатом колонок и устройством автоматической подачи образца. Для экстракции аналита аликвоту образца разбавляли 1:2 экстрагирующим раствором (метафосфорная кислота, 3 %), после чего перемешивали на вортексе и центрифугировали при 10 000 об/мин. Супернатант фильтровали через мембрану с порами 0,22 мкм. Полученную пробу использовали для анализа. Компоненты разделяли в условиях обращенно-фазной хроматографии на колонке Agilent Extend C18 (4,6×250 мм). Витамин С элюировали в изократическом режиме с подвижной фазой 30 мМ фосфатным буфером (pH 2,6) при скорости потока 1 мл/мин. Целевой компонент детектировали с помощью диодно-матричного детектора при длине волны 254 нм.

Исследование биологической совместимости штаммов *S. thermophilus* и *Lactobacillus* проводили по капельной методике [13]. Перед этим штаммы культивировали в течение 16 ч на стерильном обезжиренном молоке при температуре 37 ± 2 °С. Для оценки биосовместимости полученную культуру наносили каплей на поверхность агара с гидролизированным молоком (по ГОСТ 33951-2016) бактериологической петлей. Посев оставляли до полного впитывания капли. Затем на расстоянии 1–2 мм от первой капли наносили культуру другого тестируемого штамма и также оставляли до впитывания. Чашки инкубировали 48 ч при температуре 37 ± 2 °С в анаэробных условиях с помощью анаэростата OXOID (Thermo Fisher Scientific, США) с атмосферой, содержащей 10 % CO₂ и генерируемой газ-пакетами (ООО «ИНКО», Россия). Совместимость штаммов оценивали визуально: слияние капель указывало на биосовместимость (условное обозначение «+»). Заметная задержка роста и четко просматриваемая граница между каплями свидетельствовала об антагонизме между штаммами (условное обозначение «-»), нейтральное взаимодействие культур обозначали «±» [13].

Протеомный анализ выполняли методом ВЭЖХ-МС в обращенно-фазном режиме на хроматографе EASY-nLC 1000 (Thermo Fisher Scientific, США), совмещенном с масс-спектрометром Orbitrap Elite (Thermo Fisher Scientific, США). Применяли хроматографическую обращенно-фазную колонку (фаза Aeris XB-C18, 1,7 мкм, размер пор 100 Å; внутренний диаметр 75 мкм; длина 150 мм), изготовленную в лабораторных условиях. Состав подвижной фазы: буфер А – 0,1 % трифторуксусной кислоты в воде и 10 % ацетонитрила; буфер В – 80 % ацетонитрила и 0,1 % трифторуксусной кислоты. Хроматографическое разделение проводили при

объеме инъекции 5 мкл, градиент буфера В составлял от 10 до 60 % в течение 60 мин, скорость потока 300 нл/мин, общее время анализа 95 мин. Полный профиль градиента приведен в таблице 2. Данные обрабатывали с помощью программы PEAKS Studio-Xpro (Bioinformatics Solutions Inc., Канада).

Перед анализом предварительно обессоливали пробы на микроколонках типа ZipTip (Merck Millipore, США). При пробоподготовке к 0,5 мг образца добавляли 225 мкл 4 % трихлоруксусной кислоты, растворенной в ацетонитриле. Смесь встряхивали на вортексе в течение 15 с, затем вносили 1775 мкл 0,1 % муравьиной кислоты и инкубировали 10 мин на горизонтальном шейкере при комнатной температуре (80 об/мин). Далее смесь центрифугировали 10 мин при 4000 g. В пробирки объемом 750 мкл отбирали 500 мкл супернатанта и повторно центрифугировали 10 мин при 21 800 g. После чего отбирали 15 мкл полученного супернатанта, который анализировали с помощью ВЭЖХ-МС.

Аминокислотные последовательности, использованные для биоинформатического анализа масс-спектрометрических данных, получены из базы данных UniProt. Часть баз для различных организмов формировали непосредственно на сайте, другую (с аминокислотными последовательностями бактериоцинов) – собирали и компилировали вручную.

Для анализа, визуализации и отображения пересечения функциональных аннотаций (построения матрицы функциональной комплементарности) был задействован язык программирования Python версии 3.12 с использованием научных библиотек Pandas, NumPy и Matplotlib.pyplot.

Таблица 1. Стандарты для определения витаминов в образцах

Table 1. Standards vitamin tests

Витамин	Стандарт
А	ГОСТ 54635-2011
B ₂	ГОСТ EN 14152-2020
B ₆	ГОСТ EN 14663-2014
B ₇ (биотин)	ГОСТ EN 15607-2015
B ₉	ГОСТ 31483-2012

Таблица 2. Профиль градиента

Table 2. Gradient profile

Время, мин	% буфера В
0	10
5	10
65	60
75	100
90	100
95	10

Достоверность результатов подтверждена экспериментами, проведенными в трехкратной повторности с применением современных методов анализа, а также статистической обработкой с использованием Microsoft Excel. Построение графиков выполняли в MS Office Excel 2016. Экспериментальные данные представлены как среднее значение $\pm$ погрешность измерения (относительная), для витаминов – как среднее значение $\pm$ стандартное отклонение. Статистическую значимость различий оценивали методом ANOVA при уровне значимости $p \leq 0,05$. Исследование выполнено с использованием оборудования ФГАНУ «ВНИМИ» (Москва, Россия).

Результаты и их обсуждение

Результаты исследования содержания органических кислот в экспериментальных образцах штаммов *Streptococcus thermophilus* представлены на рисунке 1.

Способность термофильного стрептококка преобразовывать лактозу в молочную кислоту при повышенных температурах широко используется в производстве ряда молочных продуктов. Во всех исследованных образцах ожидаемо обнаруживалась молочная кислота, ее максимальное содержание выявлено у штаммов *S. thermophilus* C1, 154, 16t и 15t – 6643,5; 6611,6; 6540,9 и 6474,9 мг/кг соответственно. Концентрация лимонной и муравьиной кислот не снижалась, что свидетельствует о неспособности данных микроорганизмов катаболизировать эти органические кислоты.

Содержание витаминов в образцах исследованных штаммов *S. thermophilus* представлено на рисунке 2. Исследуемые образцы штаммов *S. thermophilus* синтезируют витамины В₂ (рибофлавин) и В₉ (фолат). Максимальное накопление рибофлавина отмечено у штамма *S. thermophilus* 12В и составило 165,33 мкг/100 г, а наибольшее продуцирование фолатов – у штаммов

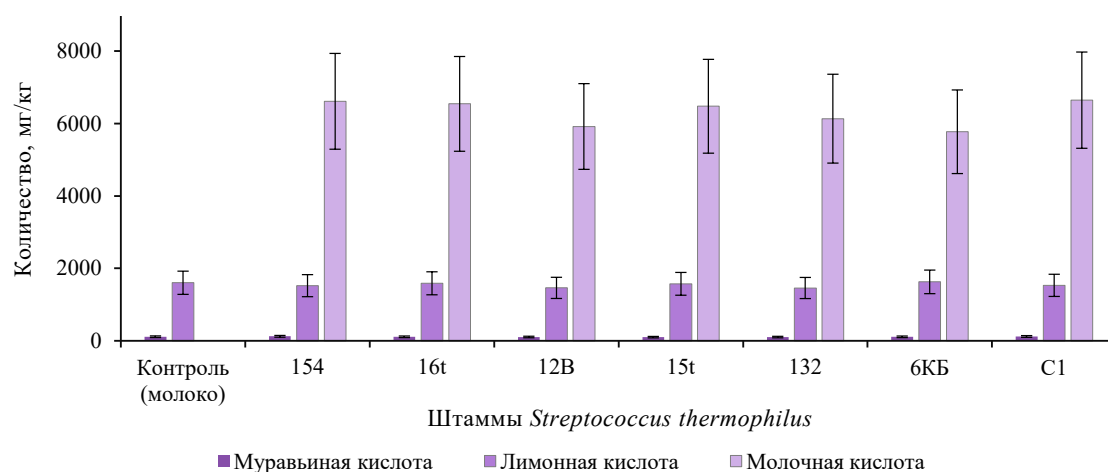


Рисунок 1. Содержание органических кислот в экспериментальных образцах

Figure 1. Organic acid content

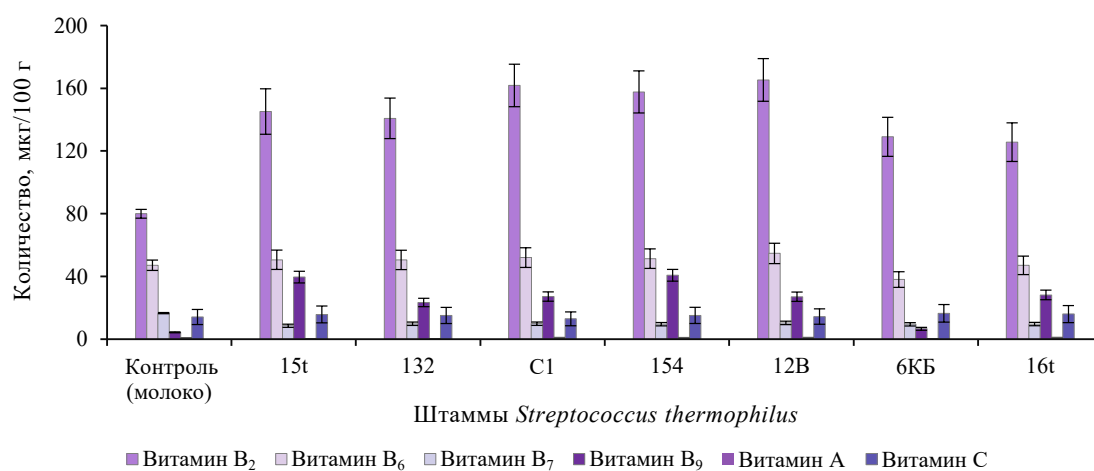


Рисунок 2. Содержание витаминов в экспериментальных образцах

Figure 2. Vitamin content

S. thermophilus 154 и 15t – 40,75 и 39,59 мкг/100 г соответственно. *S. thermophilus* обладает штамм-специфической способностью продуцировать фолиевую кислоту – важный метаболит для нормальной жизнедеятельности человека. Этот водорастворимый витамин особенно важен для беременных женщин, обеспечивая нормальное развитие эмбриона, для детей и подростков – для роста и развития, а также снижает риски когнитивных нарушений у пожилых людей. Уровень синтеза фолиевой кислоты может быть увеличен как генно-инженерными методами, так и оптимизацией условий роста микроорганизмов-продуцентов. Таким образом, полученные данные согласуются с литературными источниками о способности *S. thermophilus* к синтезу рибофлавина и фолиевой кислоты, а также о штамм-специфичности этого признака. Использование продуцентов витаминов перспективно для производства биообогащенных продуктов и может выступать альтернативой химически синтезированным витаминам [14, 15].

Содержание биотина (витамина В₇) во всех исследуемых образцах снижалось, что указывает на потребность культуры в данном веществе для роста. Количество витаминов В₆, А и С оставалось на уровне контроля.

Различия ферментативной активности входящих в консорциум микроорганизмов позволяют получать ферментированные белки молока с различными биологически активными свойствами. Оценка штаммов *S. thermophilus* 132, 6КБ, С1, 154, 12В, 16t и 15t показала высокую активность β-галактозидазы, максималь-

ные значения (5 усл. ед.) зафиксированы у штаммов 6КБ, 15t, 16t, 154. Этот фермент гидролизует лактозу с образованием галактозы и глюкозы. β-Галактозидазная активность термофильных стрептококков важна для их роста в молоке, где единственный ферментируемый сахар – лактоза [16]. Высокая активность фермента позволяет бактериям доминировать в молочной среде, способствуя образованию молочной кислоты и вытесняя нежелательные микроорганизмы. Фермент критически важен для людей с лактазной недостаточностью, частично определяя пробиотический потенциал штамма – способность улучшать усвоение молока. У штаммов 6КБ и 16t также обнаружена высокая активность протеолитического фермента лейцин-амидазы – 5,0 и 4,5 усл. ед. соответственно. Данный фермент участвует в расщеплении молочного белка с высвобождением лейцина, что может усиливать антиоксидантные свойства [17]. Протеолитическая активность, как правило, способствует проявлению более выраженной антиоксидантной активности, однако влияние других метаболитов также может быть значительно.

Для исследуемых штаммов *S. thermophilus* проведен протеомный анализ, на основе которого построена матрица функционального распределения белков (рис. 3).

В образце *S. thermophilus* C1 при поиске по базе данных для микроорганизма *S. thermophilus* идентифицировано 18 последовательностей, по которым определено 5 белковых групп, включающих 32 белка: варианты ферментов и других белков.

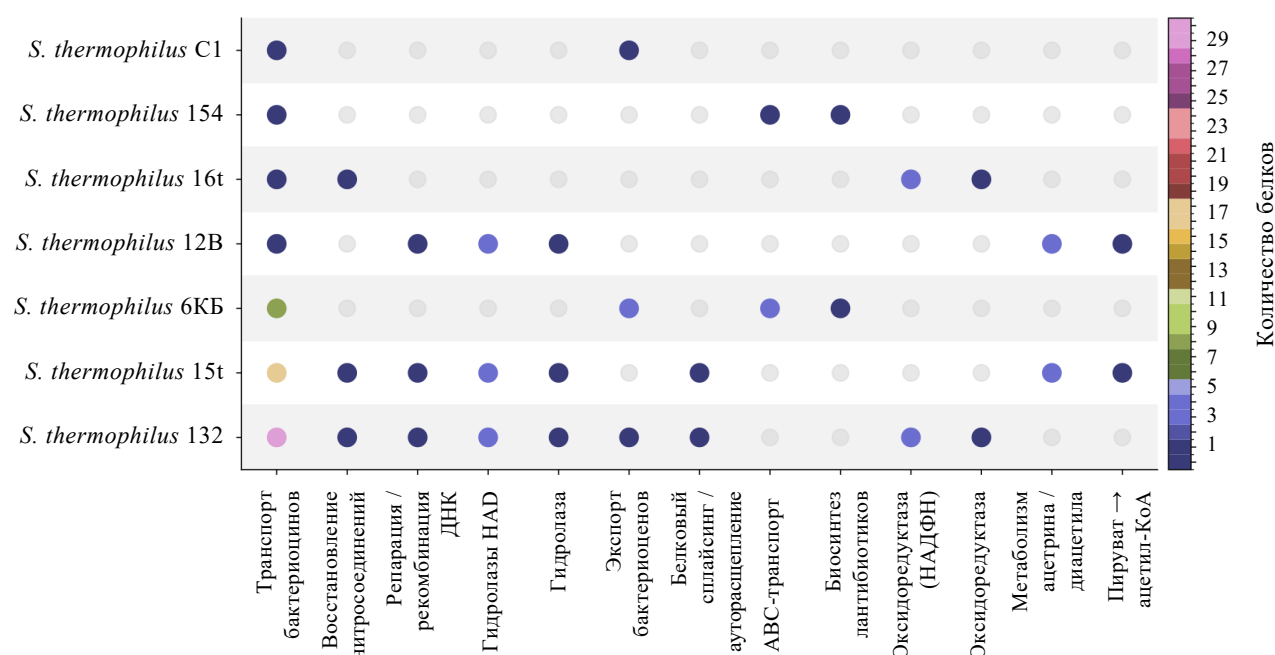


Рисунок 3. Профили распределения белков *Streptococcus thermophilus* по функциональным категориям

Figure 3. *Streptococcus thermophilus* proteins: Functional categories

При поиске по базам данных аминокислотных последовательностей бактериоцинов идентифицировано 46 последовательностей, соответствующих 2 белковым группам, содержащим 84 белка: варианты белка TonB и белка-транспортера бактериоцинов.

Обнаружен фермент эндонуклеаза R.Sth368I, защищающий микроорганизм от бактериофагов путем рестрикции. Также в ходе исследования был идентифицирован ABC-транспортер бактериоциновой системы NHLM – пептидаза / АТФ-связывающий белок. Он обеспечивает АТФ-зависимый экспорт предшественника бактериоцина из клетки с одновременным отщеплением лидерного пептида, что активирует анти-микробный пептид. В образце *S. thermophilus* при поиске по базе данных для микроорганизма выявлено 25 последовательностей, соответствующих 7 белковым группам, содержащим 31 белок: варианты ферментов и других белков.

В образце *S. thermophilus* 154 аналогично определено 14 последовательностей – 4 белковые группы, содержащие 16 белков: варианты ферментов и транспортных белков.

По базам данных аминокислотных последовательностей бактериоцинов для этого же штамма идентифицировано 62 последовательности, соответствующие 1 белковой группе, содержащей 1 белок – TolA. В белковом профиле также выявлен белок биосинтеза антибиотиков LabB и белки, участвующие в транспорте бактериоцинов.

В образце *S. thermophilus* 16t по базе данных для микроорганизма *S. thermophilus* найдено 26 последовательностей, соответствующих 6 белковым группам, содержащим 28 белков: варианты ферментов и других белков.

По базам данных аминокислотных последовательностей бактериоцинов для штамма 16t идентифицировано 65 последовательностей, соответствующих 1 белковой группе, содержащей 24 белка: варианты белка TonB, участвующего в транспорте бактериоцинов.

В образце *S. thermophilus* 12B по базе данных этого микроорганизма найдено 25 последовательностей, соответствующих 7 белковым группам, содержащим 31 белок: варианты ферментов и других белков.

По базам данных аминокислотных последовательностей бактериоцинов идентифицировано 49 последовательностей, соответствующих 1 белковой группе, содержащей 2 белка: варианты белка TolA, участвующего в транспорте бактериоцинов.

В белковом профиле штамма выявлен иммуногенный секретлируемый белок адгезии. Данные белки могут обладать иммуногенными свойствами. Также обнаружен фермент эндонуклеаза R.Sth368I, защищающий микроорганизм от действия бактериофагов путем рестрикции.

В образце *S. thermophilus* 6KB найдено 24 последовательности, по которым определили 4 белковые группы, содержащие 11 белков: варианты ферментов и других белков.

У штамма 6KB идентифицирована фруктокиназа – фермент, катализирующий перенос фосфатной группы с АТФ на фруктозу и участвующий в катаболизме фруктозы. Образующийся в ходе реакции фруктозо-6-фосфат напрямую поступает в гликолиз (путь Эмбдена-Мейергофа-Парнаса), где расщепляется до пирувата с образованием АТФ и молочной кислоты. Наличие этого фермента может свидетельствовать о способности штамма использовать фруктозу в качестве источника углерода при молочнокислом брожении.

По базам данных аминокислотных последовательностей бактериоцинов идентифицировано 36 последовательностей, соответствующих 10 белковым группам с 14 белками – транспортерами бактериоцинов и регуляторов их синтеза. Обнаружен фермент лантибиотик-дегидратаза, который дегидратирует серин и треонин в препептиде, превращая их в дегидроаланнин (Dha) и дегидробутирин (Dhb) соответственно. Данная реакция предшествует образованию тиоэфирных мостиков в молекуле лантибиотика.

Также выявлен фермент, участвующий в посттрансляционной модификации рибосомальных пептидов (RiPPs). Его ключевая функция – гетероциклизация: превращение остатков цистеина, серина или треонина в тиазолиновые / тиазольные или оксазолиновые / оксазольные кольца. Тиазол – пятичленный гетероцикл с атомами серы и азота, образующийся из остатков цистеина пептидной цепи в результате многостадийной ферментативной реакции.

В образце *S. thermophilus* 15t при поиске по базе данных для микроорганизма *S. thermophilus* найдено 9 последовательностей, соответствующих 42 белковым группам, содержащим 42 белка: варианты ферментов и других белков. Также выявлены белки, отвечающие за синтез пептидогликана клеточной стенки и транспорт бактериоцинов.

По базам данных аминокислотных последовательностей бактериоцинов для штамма 15t идентифицировано 57 последовательностей, соответствующих 1 белковой группе, содержащей 38 белков: варианты белка TonB.

В образце *S. thermophilus* 132 при поиске по базе данных для микроорганизма *S. thermophilus* найдено 28 последовательностей, соответствующих 12 белковым группам, содержащим 101 белок: варианты ферментов и других белков.

В ходе исследования идентифицирован вспомогательный белок уреазы UreF – один из четырех вспомогательных белков (UreD, UreF, UreG, UreE), необходимых для посттрансляционной активации фермента уреазы. Белок UreF не обладает каталитической активностью, но играет ключевую структурную и регуляторную роль в созревании фермента уреазы.

Уреаза катализирует гидролиз мочевины до диоксида углерода и аммиака. У *S. thermophilus* этот фермент нейтрализует кислую среду, выделяя аммиак, что предположительно, позволяет бактерии выживать и расти в условиях низкого pH.

По базам данных аминокислотных последовательностей бактериоцинов для штамма 132 идентифицирована 71 последовательность, соответствующая 1 белковой группе, содержащей 72 белка: варианты белка TolA.

В матрице функционального распределения белков наиболее выраженные межштаммовые различия касаются категорий, связанных с бактериоциновыми системами: транспорт, экспорт, импорт, защита от бактериоцинов и признаки межклеточной конкуренции. Для части штаммов эти функции представлены расширенно, тогда как у других соответствующие белки выявляются в меньшем количестве, что отражает неодинаковый потенциал штаммов к антагонистической активности и / или устойчивости к антимикробным факторам и может частично соответствовать различиям, наблюдаемым при оценке антагонизма и биосовместимости при подборе пар и многоштаммовых ассоциаций. Ряд метаболических категорий также штамм-специфичен. В частности, у части культур обнаружены белки, относящиеся к ветвям пируватного метаболизма, включая превращение пирувата в ацетил-КоА и реакции, ассоциированные с образованием ацетона / диацетила, что потенциально значимо для формирования вкусоароматического профиля ферментированного продукта. Кроме того, варьирует представленность функций репарации / рекомбинации ДНК (включая компоненты систем репарации, такие как MutS2), а также белков, участвующих в адгезии и окислительно-восстановительных реакциях, что отражает различия в адаптационном потенциале штаммов и их устойчивости в технологических условиях. Исследуемые для конструирования консорциумов штаммы *S. thermophilus* характеризуются различающимися и потенциально комплементарными профилями распределения белков по функциональным категориям (рис. 3).

Наиболее функционально насыщенным среди исследованных штаммов является *S. thermophilus* 132, для которого характерно одновременное присутствие

белков нескольких метаболических и адаптивных блоков, что указывает на повышенную метаболическую пластичность и потенциальную устойчивость при совместном культивировании. Штаммы *S. thermophilus* 12В и 15t отличаются более выраженной представленностью категорий, связанных с центральным обменом и перераспределением потоков пирувата, и в большей степени определяют направленность брожения и отдельные технологически значимые признаки продукта. *S. thermophilus* C1 характеризуется более компактным профилем с относительным усилением функций, отвечающих за поддержание генетической стабильности (репарация и рекомбинация ДНК), что потенциально способствует воспроизводимости штамм-специфических характеристик. *S. thermophilus* 154 демонстрирует ограниченную представленность большинства категорий при сохранении базовых метаболических и транспортных функций, что позволяет рассматривать его как компонент с более предсказуемым функциональным вкладом при включении в консорциумы.

Исследуемые штаммы *S. thermophilus* были проверены на биосовместимость с представителями лактобацилл (табл. 3). Штамм *Lactobacillus acidophilus* C2 совместим с культурами *S. thermophilus* 132, 6КБ и C1. Штамм *Lb. helveticus* 100АШ биосовместим со штаммами *S. thermophilus* 12В, 154 и 132. Штамм *Lb. bulgaricus* Lb100 совместим со штаммом *S. thermophilus* C1 и проявлял выраженный антагонизм к штамму *S. thermophilus* 16t. Штамм *B. adolescentis* MC-42 биосовместим со всеми изученными культурами *S. thermophilus*. Штамм *Lb. helveticus* 18a совместим только со штаммом *S. thermophilus* C1, а к остальным исследуемым штаммам *S. thermophilus* демонстрировал высокий антагонизм (рис. 4).

Результаты оценки биосовместимости штаммов молочнокислых бактерий свидетельствуют о возможности совместного культивирования отдельных штаммов в подобранных сочетаниях, а также об их применении в составе многоштаммовых заквасок для производства кисломолочных продуктов.

Таблица 3. Биосовместимость штаммов *Streptococcus thermophilus* с пробиотическими культурами

Table 3. *Streptococcus thermophilus* and probiotic cultures: Biocompatibility

Штамм	<i>Lactobacillus acidophilus</i> C2	<i>Lactobacillus helveticus</i> 18a	<i>Lactobacillus helveticus</i> 100АШ	<i>Lactobacillus bulgaricus</i> Lb100	<i>Bifidobacterium adolescentis</i> MC-42
<i>Streptococcus thermophilus</i> C1	+	+	—	+	+
<i>Streptococcus thermophilus</i> 154	—	—	+	±	+
<i>Streptococcus thermophilus</i> 15t	±	—	+	±	+
<i>Streptococcus thermophilus</i> 6КБ	+	—	—	+	+
<i>Streptococcus thermophilus</i> 132	+	—	+	±	+
<i>Streptococcus thermophilus</i> 12В	—	—	+	±	±
<i>Streptococcus thermophilus</i> 16t	±	±	±	—	±

Примечание: «+» – штаммы совместимы; «±» – нейтральное взаимодействие штаммов; «—» – штаммы несовместимы.

Note: “+” – strains are compatible; “±” – neutral interaction of strains; “—” – strains are incompatible.

Рисунок 4. Совместимость штамма *Lactobacillus helveticus* 18a со штаммами *Streptococcus thermophilus*Figure 4. *Lactobacillus helveticus* 18a and *Streptococcus thermophilus*: Compatibility testТаблица 4. Варианты микробных консорциумов штаммов *Streptococcus thermophilus*Table 4. Microbial consortia with *Streptococcus thermophilus* strains

Номер образца	Соотношение штаммов, часть	Штаммы	Соотношение штаммов, часть	Номер образца
1	6	<i>Bifidobacterium adolescentis</i> MC-42	6	1/1
	2	<i>Lactobacillus acidophilus</i> C2	1	
	1	<i>Streptococcus thermophilus</i> 132	1	
2	6	<i>Bifidobacterium adolescentis</i> MC-42	6	2/1
	1	<i>Lactobacillus helveticus</i> 100АШ	2	
	1	<i>Streptococcus thermophilus</i> 132	1	
2/2	6	<i>Bifidobacterium adolescentis</i> MC-42	6	2/3
	2	<i>Lactobacillus helveticus</i> 100АШ	2	
	1	<i>Streptococcus thermophilus</i> 154	–	
	–	<i>Streptococcus thermophilus</i> 15t	1	
3	6	<i>Bifidobacterium adolescentis</i> MC-42	6	3/1
	2	<i>Lactobacillus acidophilus</i> C2	1	
	1	<i>Streptococcus thermophilus</i> C1	1	
4	6	<i>Bifidobacterium adolescentis</i> MC-42	6	4/1
	2	<i>Lactobacillus acidophilus</i> C2	1	
	3	<i>Streptococcus thermophilus</i> 6КБ	1	
5	6	<i>Bifidobacterium adolescentis</i> MC-42	6	5/1
	2	<i>Lactobacillus helveticus</i> 18a	1	
	2	<i>Streptococcus thermophilus</i> C1	1	
6/1	6	<i>Bifidobacterium adolescentis</i> MC-42	6	6/2
	1	<i>Lactobacillus bulgaricus</i> Lb100	2	
	3	<i>Streptococcus thermophilus</i> C1	2	
7	6	<i>Bifidobacterium adolescentis</i> MC-42	6	7/1
	1	<i>Lactobacillus bulgaricus</i> Lb100	1	
	2	<i>Streptococcus thermophilus</i> 6КБ	1	
8	6	<i>Bifidobacterium adolescentis</i> MC-42	6	8/1
	1	<i>Lactobacillus bulgaricus</i> Lb100	1	
	2	<i>Streptococcus thermophilus</i> 15t	1	

На основе экспериментов разработаны варианты микробных консорциумов с прогнозируемыми свойствами с участием изученных штаммов (табл. 4).

Вкус является ключевым фактором, определяющим предпочтения потребителей молочных продуктов, поэтому на первом этапе изучены различные варианты соотношений культур, обеспечивающие необхо-

димые органолептические характеристики образцов, полученных на основе сконструированных микробных консорциумов. Среди представленных 18 образцов отобраны: № 1; 2/1; 2/2; 2/3; 3; 5; 6/1; 6/2; 7. Полученные образцы также охарактеризованы по активности сквашивания, титруемой и активной кислотности, условной вязкости (табл. 5).

Таблица 5. Производственно значимые свойства разработанных микробных консорциумов

Table 5. Microbial consortia with *Streptococcus thermophilus*: Commercially significant properties

Номер образца	Активность сквашивания	Кислотность		Условная вязкость, с	Органолептические характеристики
		Активная, ед. pH	Титруемая, °Т		
1	7 ч	4,93	87	32	Консистенция однородная, колющаяся; вкус и запах чистый кисломолочный, легкий аромат
2/1	6 ч 15 мин	4,85	75	28	Консистенция однородная, колющаяся; вкус и запах чистый кисломолочный, без особенностей
2/2	6 ч 20 мин	4,86	97	85	Консистенция однородная, колющаяся, очень нежная, слегка слизистая, вкус и запах чистый кисломолочный, приятный аромат
2/3	6 ч 40 мин	4,88	96	10	Консистенция однородная, колющаяся, приятный чистый кисломолочный вкус, приятный аромат
3	7 ч 30 мин	5,03	97	37	Консистенция однородная, колющаяся, обволакивающая, приятный чистый сливочный кисломолочный вкус и аромат
5	6 ч 20 мин	4,99	93	93	Консистенция однородная, колющаяся, плотная, вязкая, чистый сливочный кисломолочный вкус, приятный выраженный аромат
6/1	6 ч 20 мин	4,96	97	22	Консистенция однородная, колющаяся, чистый кисломолочный вкус
6/2	6 ч 20 мин	4,96	90	23	Консистенция однородная, плотная, колющаяся, чистый кисломолочный вкус, приятный аромат
7	6 ч 20 мин	4,98	93	46	Консистенция однородная, колющаяся, обволакивающая, очень нежный, чистый кисломолочный вкус

В выбранных консорциумах определяли количество клеток пробиотических и молочнокислых культур, входящих в ассоциацию. Установлено, что количество клеток *B. adolescentis* MC-42 в образцах достигло $n \times 10^6$ КОЕ/см³, а количество клеток молочнокислых бактерий – $n_1 \times 10^9$ КОЕ/см³, что соответствует требованиям нормативных документов (ТР ТС 033/2013 и ГОСТ 32923-2014). При микроскопии в поле зрения отмечалось характерное для каждой ассоциации соотношение палочковидных и кокковых форм.

Выводы

Подробно охарактеризованы производственно ценные штаммы *Streptococcus thermophilus* для создания микробных консорциумов с их участием. Для оценки штаммов использованы микробиологические, биохимические и физико-химические методы, а также протеомный анализ. На основе протеомных профилей *S. thermophilus* была построена матрица функционального распределения белков с наиболее выраженными межштаммовыми различиями, что необходимо для конструирования консорциумов. Изучение биосовместимости отобранных культур с пробиотическими штаммами лактобацилл и *Bifidobacterium adolescentis*

MC-42 показало возможность совместного культивирования некоторых штаммов молочнокислых бактерий в подобранных сочетаниях, а также их использования в составе многоштаммовых заквасок для получения кисломолочных продуктов с прогнозируемыми свойствами. С опорой на экспериментальные данные спроектировано 18 вариантов микробных консорциумов с участием изученных штаммов *S. thermophilus*. Анализ их производственно значимых свойств, включая органолептические показатели, подтвердил перспективность 9 вариантов.

Результаты, полученные в работе, создают основу для дальнейших исследований. Есть сведения, что биосовместимость культур, которые входят в консорциум, не всегда гарантирует синергическое влияние изученных штаммов *S. thermophilus* друг на друга и сохранение их свойств [19]. Микробные консорциумы для производства продуктов с подтвержденными функциональными характеристиками, такими как повышенная биодоступность питательных веществ, выраженное антагонистическое действие по отношению к патогенным микроорганизмам, способность синтезировать биологически активные вещества и антиоксиданты, должны быть дополнительно

изучены и проанализированы по описанным ранее показателям, что будет реализовано на следующих этапах работы.

Критерии авторства

С. А. Кишилова – проведение экспериментальных исследований, анализ и обобщение полученных данных, написание текста рукописи. В. А. Леонова – проведение экспериментальных исследований, работа с литературными источниками, редактирование текста рукописи. В. А. Митрова – проведение экспериментальных исследований, подготовка проб. В. А. Семенова – обработка и обобщение результатов, визуализация данных (построение графиков), редактирование рукописи. Н. С. Пряничникова – итоговое редактирование и вычитка рукописи, подготовка к публикации. В. К. Семипятный – статистическая обработка данных, обобщение результатов, построение графиков. И. В. Рожкова – руководство проектом НИР, общее редактирование рукописи. А. Г. Галстян – разработка концепции исследования.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution

S.A. Kishilova was responsible for the experimental research, data analysis / synthesis, and manuscript writing. V.A. Leonova performed the experimental research, wrote the review, and proofread the manuscript. V.A. Mitrova performed the experimental research and prepared the samples. V.A. Semenova processed and interpreted the results, visualized the data (plotting graphs), and proofread the manuscript. N.S. Pryanichnikova proofread and formatted the manuscript. V.K. Semipyatnyi performed the statistical analysis, synthesized the results, and visualized the plotting graphs. I.V. Rozhkova supervised the project and proofread the manuscript. A.G. Galstyan developed the research concept.

Conflict of interest

The authors state that there is no conflict of interest.

Список литературы / References

1. Федоров С. С., Забайкин Ю. В. Использование микроорганизмов в пищевых технологиях в целях экономической эффективности. Экономика: вчера, сегодня, завтра. 2023. Т. 13. № 2. С. 444–451. [Fedorov SS, Zabajkin YV. The use of microorganisms in food technologies for economic efficiency. Economics: Yesterday, Today and Tomorrow. 2023;13(2):444–451. (In Russ.)] <https://doi.org/10.34670/AR.2023.96.71.011>
2. Зобкова З. С. Зависимость относительной биологической ценности кисломолочных напитков от вида заквасочных микроорганизмов. Молочная промышленность. 2020. № 8. С. 36–37. [Zobkova ZS. Dependence of the relative biological value of fermented milk drinks on the type of starter microorganisms. Dairy Industry. 2020;(8):36–37. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/XZVCXA>
3. Кишилова С. А., Леонова В. А., Митрова В. А., Рожкова И. В. Современные биотехнологические решения в области использования молочнокислых бактерий для молочной промышленности: от селекции штаммов до пробиотических продуктов. Техника и технология пищевых производств. 2025. Т. 55. № 3. С. 624–633. [Kishilova SA, Leonova VA, Mitrova VA, Rozhkova IV. Advanced biotechnological solutions for lactic acid bacteria in dairy industry: From strain selection to probiotic products. Food Processing: Techniques and Technology. 2025;55(3):624–633. (In Russ.)] <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2025-3-2596>
4. Huang Y-Y, Lu Y-H, Liu X-T, Wu W-T, Li W-Q, et al. Metabolic properties, functional characteristics, and practical application of *Streptococcus thermophilus*. Food Reviews International. 2023;40(2):792–813. <https://doi.org/10.1080/87559129.2023.2202406>
5. Галочкина Н. А., Глотова И. А., Толкачева А. А. Термофильный стрептококк: технологическая функциональность в пищевых системах, полезные для здоровья продукты метаболизма, видовая идентификация. Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания. 2024. № 1. С. 44–50. [Galochkina NA, Glotova IA, Tolkacheva AA. Thermophilic streptococcus: Technological functionality in food systems, beneficial to health metabolic products, species identification. Technologies of the Food and Processing Industry of the Agro-Industrial Complex – Healthy Food Products. 2024;(1):44–50. (In Russ.)] <https://doi.org/10.24412/2311-6447-2024-1-44-50>
6. Ботина С. Г., Рожкова И. В., Семенихина В. Ф. Штаммы *Streptococcus thermophilus*, продуцирующие экзополисахариды. Хранение и переработка сельхозсырья. 2010. № 2. С. 33–35. [Botina SG, Rozhkova IV, Semenikhina VF. Strains *Streptococcus thermophilus*, producing exopolysaccharides. Storage and Processing of Farm Products. 2010;(2):33–35. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/LAMCNL>
7. Хавкин А. И., Васия М. Н., Новикова В. П. Биологическая роль казоморфинов (часть 1). Экспериментальная и клиническая гастроэнтерология. 2021. № 12. С. 102–109. [Khavkin AI, Vasia MN, Novikova VP. The biological role of casomorphins. Experimental and Clinical Gastroenterology. 2021;12:102–109. (In Russ.)] <https://doi.org/10.31146/1682-8658-ecg-196-12-102-109>
8. Агаркова Е. Ю., Кручинин А. Г., Рязанцева К. А. Современные технологические подходы к обогащению молочных продуктов. Инновационные технологии обогащения молочной продукции (теория и практика). Под ред. Федотовой О. Б. М.: Франтера, 2016. С. 110–142. [Agarkova EYu, Kruchinin AG, Ryazanceva KA. Advanced technological

approaches to fortification of dairy products. Innovative dairy fortification: Theory and practice. In: Fedotova OB, editor. Moscow: The Fritter; 2016. pp. 110–142. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/TYREJH>

9. Iyer R, Tomar SK, Uma Maheswari T, Singh R. *Streptococcus thermophilus* strains: Multifunctional lactic acid bacteria. International Dairy Journal. 2010;20(3):133–141. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2009.10.005>

10. Roux E, Nicolas A, Valence F, Siekaniec G, Chuat V, et al. The genomic basis of the *Streptococcus thermophilus* health-promoting properties. BMC Genomics. 2022;23(1):210. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1081849/v1>

11. Holasová M, Fiedlerová V, Roubal P, Pechačová M. Biosynthesis of folates by lactic acid bacteria and propionibacteria in fermented milk. Czech Journal of Food Sciences. 2004;22(5):175. <https://doi.org/10.17221/3421-cjfs>

12. Семенова В. А., Митрова В. А., Кишилова С. А., Рожкова И. В. Сравнительная оценка производственно значимых свойств штаммов *Streptococcus thermophilus*. Пищевая промышленность. 2025. № 10. С. 42–48. [Semenova VA, Mitrova VA, Kishilova SA, Rozhkova IV. Comparative assessment of the production related properties of *Streptococcus thermophilus* strains. Food Processing Industry. 2025;10:42–48. (In Russ.)] <https://doi.org/10.52653/PPI.2025.10.10.008>

13. Волкова Г. С., Сербя Е. М. Создание многостаммового бактериального консорциума для технологии пробиотических препаратов кормового назначения. Техника и технология пищевых производств. 2021. Т. 51. № 2. С. 260–269. [Volkova GS, Serba EM. New multistrain bacterial consortium for feed probiotics. Food Processing: Techniques and Technology. 2021;51(2):260–269. (In Russ.)] <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-2-260-269>

14. Meucci A, Rossetti L, Zago M, Mohedano ML, Vignolo GM, et al. Folate biosynthesis by *Streptococcus thermophilus* during growth in milk. Food Microbiology. 2018;69:116–122. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2017.08.001>

15. Hernández-Alcántara AM, Pando S, Molenado ML, Vignolo GM, Moreno de LeBlanc A, et al. The ability of riboflavin-overproducing *Lactiplantibacillus plantarum* strains to survive under gastrointestinal conditions. Frontiers in Microbiology. 2020;11:591945. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.591945>

16. Vasudha M, Prashantkumar C, Bellurka M, Kaveeshwar V, Gayathri D. Probiotic potential of β -galactosidase-producing lactic acid bacteria from fermented milk and their molecular characterization. Biomedical Reports. 2023;18(3):23. <https://doi.org/10.3892/br.2023.1605>

17. Бычкова Т. С., Крутина Е. М., Дягилева Ю. А. Зависимость аминокислотного профиля и антиоксидантного потенциала кисломолочных продуктов от ферментативной активности молочнокислых микроорганизмов. Пищевая метаинженерия. 2025. Т. 3. № 3. С. 39–52. [Bychkova TS, Krutina EM, Diaghileva YuA. Dependence of the amino acid profile and antioxidant potential of fermented milk products on the enzymatic activity of lactic acid microorganisms. Food Metaengineering. 2025;3(3):39–52. (In Russ.)] <https://doi.org/10.37442/fme.2025.3.85>

18. Loghman S, Moayed A, Mahmoudi M, Khomeiri M, Gómez-Mascaraque LG, et al. Single and co-cultures of proteolytic lactic acid bacteria in the manufacture of fermented milk with high ACE inhibitory and antioxidant activities. Fermentation. 2022;8(9):448. <https://doi.org/10.3390/fermentation8090448>

19. Щёкотова А. В., Атласова Д. В. Изучение биологических взаимоотношений и биохимических свойств пробиотических микроорганизмов. Вестник ВСГУТУ. 2022. № 3. С. 36–45. [Shchyokotova AV, Atlasova DV. Study of biological relationships and biochemical properties of probiotic microorganisms. Bulletin ESSUTM. 2022;3:36–45. (In Russ.)] https://doi.org/10.53980/24131997_2022_3_36

Дополнительная информация об авторах / Additional information about the authors

Кишилова Светлана Анатольевна / Svetlana A. Kishilova ORCID 0009-000-9498-4757; eLIBRARY SPIN 6468-8432

Леонова Виктория Александровна / Victoria A. Leonova ORCID 0000-0003-2691-8859; eLIBRARY SPIN 8717-5164

Митрова Вера Анатольевна / Vera A. Mitrova ORCID 0009-0004-6826-988X; eLIBRARY SPIN 9975-0705

Семенова Виктория Александровна / Victoria A. Semenova ORCID 0009-0003-6328-9155; eLIBRARY SPIN 2717-1115

Пряничникова Наталия Сергеевна / Nataliya S. Pryanichnikova ORCID 0000-0003-1304-1517; eLIBRARY SPIN 4098-8778

Семипятный Владислав Константинович / Vladislav K. Semipyatnyy ORCID 0000-0003-1241-0026;

eLIBRARY SPIN 4246-3862

Рожкова Ирина Владимировна / Irina V. Rozhkova ORCID 0000-0003-4441-4515; eLIBRARY SPIN 8595-9155

Галстян Арам Генрихович / Aram G. Galstyan ORCID 0000-0002-0786-2055; eLIBRARY SPIN 9355-5603

<https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-2-2642>
<https://elibrary.ru/PWBXAV>

Оригинальная статья
<https://fptt.ru>

Разработка продуктов профилактической направленности из мяса яка



Б. С. Тамабаева¹, Н. А. Кыдыралиев²,
Э. М. Абакирова^{1,*}, М. А. Азисова¹

¹ Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова^{ROR}, Бишкек, Кыргызстан

² Кыргызско-Турецкий университет «Манас»^{ROR}, Бишкек, Кыргызстан

Поступила в редакцию: 19.12.2025

Принята после рецензирования: 20.01.2026

Принята к публикации: 10.03.2026

*e-mail: mairambekovna@mail.ru

© Б. С. Тамабаева, Н. А. Кыдыралиев, Э. М. Абакирова,

М. А. Азисова, 2026



Аннотация.

Пищевая отрасль Кыргызской Республики располагает значительным сырьевым потенциалом. Одной из важнейших государственных задач является оздоровление населения посредством обеспечения его качественными продуктами питания. В последние годы в Кыргызской Республике увеличилось число заболеваний, связанных с дефицитом железа и йода (анемия и болезни щитовидной железы). Цель исследования – разработать новый продукт на основе мяса яка, обогащенный йодом растительного происхождения, способный восполнять дефицит микроэлемента в организме, а также комплексно оценить его минеральный состав, органолептические свойства и микробиологическую безопасность.

Объекты исследования – образцы сушеной ламинарии (производство Китай) и мясо, полученное из лопаточной части яков-быков, выращенных в Кыргызской Республике. Минеральный состав определяли методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой, микробиологические показатели и содержание токсичных элементов (ртути, мышьяка, свинца, кадмия) и пестицидов – по стандартным методикам, оптимальную дозировку йодсодержащей добавки – органолептическим методом по 9-балльной шкале.

Установлено, что содержание йода в мясе яка составило 3,82 мкг/100 г, в ламинарии – 516,00 мкг/100 г. Оптимальная дозировка ламинарии – 1,5 % от массы сырья. В готовом продукте содержание йода достигло 20,9 мкг/100 г, что значительно выше, чем в контрольном образце без ламинарии (4,9 мкг/100 г). Несмотря на потери в процессе термообработки, количество железа в готовом рулете 5003,0 мкг/100 г (5,03 мг/100 г), при этом в рулете без ламинарии – 2610,0 мкг/100 г (2,61 мг/100 г).

Разработанный мясной рулет с ламинарией имеет профилактическую направленность и может быть рекомендован для обогащения рациона йодом и железом.

Ключевые слова. Пищевая добавка, ламинария, мясо яка, лопаточная часть, тепловая обработка, продукт функциональной направленности

Для цитирования: Тамабаева Б. С., Кыдыралиев Н. А., Абакирова Э. М., Азисова М. А. Разработка продуктов профилактической направленности из мяса яка. Техника и технология пищевых производств. 2026. Т. 56. № 2. С. 354–367. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-2-2642>

Functional Yak Meat Products



Bibikul S. Tamabaeva¹, **Nurudin A. Kydyraliev²**,
Eliza M. Abakirova^{1,*}, **Munara A. Azisova¹**

¹ Kyrgyz State Technical University named after I. Razzakov^{ROR}, Bishkek, Kyrgyzstan

² Kyrgyz-Turkish Manas University^{ROR}, Bishkek, Kyrgyzstan

Received: 19.12.2025
Revised: 20.01.2026
Accepted: 10.03.2026

*e-mail: mairambekovna@mail.ru
© B.S. Tamabaeva, N.A. Kydyraliev, E.M. Abakirova, M.A. Azisova, 2026



Abstract.

The Kyrgyz food industry relies on significant raw material potential. Improving public health through healthy food is one of the state's priorities, especially due to the growing incidence of anemia and thyroid diseases associated with iron and iodine deficiencies. This article describes a novel yak meatloaf fortified with plant-based iodine. To evaluate its ability to address micronutrient deficiencies, the authors conducted a comprehensive assessment of its mineral composition, sensory properties, and microbiological safety.

The experimental meatloaf consisted of shoulder-blade yak meat and dried kelp (imported from China). Its mineral composition was determined using inductively coupled plasma atomic emission spectroscopy. The microbiological parameters, toxicity levels (mercury, arsenic, lead, cadmium), and pesticide content were analyzed using standard methods. The optimal dose of the iodine-containing supplement was determined via sensory assessment based on a nine-point scale.

The iodine content in the yak meat and kelp was 3.82 µg/100 g and 516.0 µg/100 g, respectively. The optimal proportion of kelp was found to be 1.5% of the raw material weight. The iodine content in the finished product reached 20.9 µg/100 g, compared to 4.87 µg/100 g in the control sample without kelp. The iron content in the final meatloaf reached 5.03 mg/100 g, compared to 2.61 mg/100 g in the control sample.

Despite heat-induced losses, the final meatloaf contained 20.9 µg/100 g of iodine and 5.03 mg/100 g of iron. This kelp-fortified meatloaf demonstrated reliable functional properties and can be recommended for therapeutic diets fortified with iodine and iron.

Keywords. Additive, kelp, yak meat, shoulder blade meat, heat treatment, functional product

For citation: Tamabaeva BS, Kydyraliev NA, Abakirova EM, Azisova MA. Development of Preventive Yak Meat Products. Food Processing: Techniques and Technology. 2026;56(2):354–367. (In Russ.) <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-2-2642>

Введение

Одной из важнейших задач, стоящих перед мясной отраслью, является разработка продуктов из экологически чистого сырья. Наряду с повышением экологической безопасности вырабатываемой продукции, особого внимания заслуживают технологии, позволяющие обеспечить население продуктами, способствующими решению медико-социальных проблем, связанных с естественной нехваткой необходимых макро- и микроэлементов, в частности йода и железа. Актуальность вопроса определяется серьезными негативными последствиями недостатка йода, затрагивающими людей разных возрастных категорий (от влияния на репродуктивную функцию до умственного развития и трудовой деятельности) [1–3]. Дефицит йода – устойчивая тенденция, поэтому соответствующие вопросы сохраняют свою значимость [4, 5]. По последним глобальным оценкам, 1,88 млрд человек, включая 241 млн детей школьного возраста, не получают достаточного количества йода с пищей [6]. Хотя дефицит йода может быть более серьезным состоянием в раз-

вивающихся странах, он в равной степени затрагивает как их, так и развитые государства. Проблема йодного дефицита затрагивает все население Кыргызской Республики. Научные исследования подтверждают наличие зубной эндемии средней тяжести в большинстве регионов страны, что указывает на серьезность ситуации [7]. По данным на 2022 г., железодефицитная анемия была диагностирована у 88 159 человек, а болезни щитовидной железы – у 13 892 человек¹.

На сегодняшний день для борьбы с дефицитом йода применяют различные добавки, содержащие этот элемент, которые вводятся в продукты питания. Однако большая часть не обеспечивает желаемого эффекта из-за низкой активности йода и нестабильности при хранении. Наиболее перспективным направлением в профилактике йододефицита является биологический подход, основанный на обогащении рациона населения продуктами, содержащими йод в органической форме.

¹ Число заболеваний по основным группам. Национальный статистический комитет Кыргызской Республики. 2022. URL: www.stat.kg/ru/statistics/zdravoohranenie (дата обращения: 22.10.2025).

Введение функциональных компонентов в процессе производства позволяет целенаправленно изменять свойства продукта, формировать определенный химический состав и усиливать оздоровительный эффект.

Микроэлемент йод необходим для синтеза гормонов щитовидной железы – трийодтиронина и тироксина, что определяет его основную биологическую функцию. Преобладающую часть органического йода в крови (до 90 %) составляет тироксин. Основным путем поступления йода в организм – алиментарный, при этом на пищу приходится около 90 % от общего количества элемента.

Дефицит йода нередко приводит к железодефицитной анемии вследствие замедления метаболических процессов. Данное состояние характеризуется низким уровнем железа в крови, носит невыраженный характер и проявляется на поздних стадиях гипотиреоза [8].

Железо – распространенный многофункциональный биоэлемент, служащий основой для адекватной жизнедеятельности клеточных структур во всех физиологических системах организма. Ключевая роль железа заключается в кофакторной функции, обеспечивающей связывание, транспорт и депонирование молекулярного кислорода гемоглобином и миоглобином. Вместе с тем установлено, что данный микроэлемент выполняет не только перечисленные функции, но и является универсальным компонентом живой клетки, участвует в широком спектре метаболических процессов, поддерживает рост организма и обеспечивает тканевое, в частности митохондриальное дыхание, что делает его жизненно необходимым для существования клеток на протяжении всей эволюции.

Синтез гормонов щитовидной железы и поддержание высокого уровня иммунной защиты организма тесно связаны с деятельностью железосодержащих ферментов. Оптимальное содержание железа в организме обуславливает полноценную работу факторов неспецифической защиты, а также клеточного, гуморального и местного иммунитета.

Железодефицит в организме человека проявляется не только гематологически, но и вызывает дисфункцию клеточных систем, особенно в тканях с высокой потребностью в кислороде, где нарушения обмена железа индуцируют ряд неблагоприятных эффектов. Недостаточное поступление этого незаменимого микронутриента приводит к нарушению синтеза гемоглобина, что неизбежно влечет анемию. Последствия этого – нарушение питания органов и тканей, а также, во многих случаях, поведенческие аномалии и психопатологические проявления, связанные со снижением уровня железа.

Дефицит железа оказывает отрицательное влияние на синтез гормонов в щитовидной железе, что приводит к снижению активности тиройдпероксидазы – гемзависимого фермента, играющего ключевую роль в этом процессе. Железодефицитная анемия ухудшает усвоение йода, тогда как восполнение этого состояния способствует повышению результативности йодотерапии [8].

В результате хранения и кулинарной обработки содержание йода в пищевых продуктах значительно уменьшается. В процессе приготовления продуктов питания потери йода зависят от степени измельчения продукта и способа термообработки: при жарке они составляют 65 %, при варке – около 48 % [9].

Термическая обработка мясoproductов осуществляется разными методами, выбор которых определяется поставленной задачей. При нагревании происходит изменение свойств готовых изделий, что связано преимущественно с эндогенными изменениями в мясе и испарением отдельных компонентов. При этом способ термообработки и наличие защитного покрытия на поверхности продукта определяют количество и состав испаряющихся веществ.

В индустрии переработки мяса и секторе общественного питания наблюдается тенденция к внедрению технологии термообработки при пониженных температурных условиях и увеличенной продолжительности, известной как «Sous-Vide». Данная технология при производстве продуктов позволяет значительно уменьшить нежелательные потери, ухудшающие органолептические характеристики готового изделия. Метод включает в себя герметичную упаковку мясного изделия в термостойкий полимер и последующую термообработку при пониженных температурных режимах. Таким образом, технология «Sous-Vide» позволяет сохранить ценные характеристики продукта, свести к минимуму потери его массы в процессе производства, сделать его более привлекательным для потребителя с точки зрения вкуса, запаха и внешнего вида, а также продлить срок хранения [10]. Результаты исследований [11, 12] продемонстрировали, что экспозиция в режиме низких положительных температур на протяжении длительного времени способствует повышению нутритивной ценности, оптимизации структуры, улучшению органолептических показателей и увеличению выхода готового продукта.

С учетом научных работ отечественных и зарубежных авторов [13–16] выделены ключевые стадии процесса приготовления продуктов питания посредством тепловой обработки «Sous-Vide». На подготовительном этапе сырье подвергается предварительной обработке: для мясных полуфабрикатов это включает жиловку, посол, вымачивание, внесение вкусовых добавок и формовку изделия. При приготовлении сложных блюд с использованием круп, овощей и мяса к перечисленным операциям добавляются промывка и нарезка овощного сырья, а также контроль качества зерновых.

Упаковка полуфабриката предусматривает размещение изделий после формовки в полимерные гибкие пакеты, предназначенные для использования при высоких температурах. Сначала рассчитывается удельная масса продукта (на 1 см² площади пакета), затем пакет помещается в вакуумную среду, где барометрическое давление снижается с интенсивностью 1,5–2,0 %/с

до достижения уровня вакуума 97,0–99,9 %, после чего процесс завершается герметичным запаиванием пакета.

Качество упакованных полуфабрикатов достигается продолжительной термообработкой в щадящем температурном режиме при 65–95 °С. Варочный котел, используемый для данного процесса, оборудован для обеспечения точного контроля: он оснащен датчиком температуры греющей среды, напольным датчиком для определения температуры в толще изделия в интервале 45–65 °С и термостатом теплоносителя. Равномерный прогрев достигается за счет применения погружного циркулятора и барботера. Время обработки, необходимое для достижения нужного результата, варьируется от 2 до 17 ч и зависит от особенностей обрабатываемого изделия.

Инновационные исследования российских ученых позволили усовершенствовать метод тепловой обработки «Sous-Vide», что открыло новые возможности для выпуска высококачественных мелкокусковых полуфабрикатов из говядины [13]. На основании этого установлено, что температурный режим в пределах 363–368 К является наиболее благоприятным для термообработки подмороженных мелкокусковых полуфабрикатов из говядины, упакованных в вакуумную полимерную тару. Данный процесс способствует улучшению органолептических характеристик конечного продукта, повышая его сочность и увеличивая концентрацию экстрактивных веществ. При этом питательность продукта возрастает на 7–8 %, а его выход повышается на 15–20 %. Указанные изменения способствуют увеличению срока хранения до 3 суток без учета специальных температурных режимов.

Н. С. Родионова и др. [17] создали технологию, позволяющую улучшить качество свиного полуфабриката, которая включает в себя вакуумирование полуфабриката в полимерную упаковку с последующей термической обработкой при температуре 59 °С. По сравнению с традиционным способом обработки, разработанный метод обеспечивает повышение биологической ценности полуфабриката в интервале 10–15 %, снижение технологических потерь и увеличение выхода конечного продукта на 15–20 % [17].

Таким образом, технология «Sous-Vide» обладает рядом значительных преимуществ:

- минимальные потери массы продукта в процессе приготовления;
- повышение пищевой ценности продукта благодаря уменьшению потерь витаминов и других полезных веществ, разрушающихся при высоких температурах;
- сохранение естественного вкуса и аромата продукта, улучшение внешнего вида, консистенции (нежная и сочная).

Научные публикации в области термообработки методом «Sous-Vide» касались в основном таких видов мясного сырья, как свинина и говядина, что выявлено по результатам аналитического обзора отечественных и зарубежных литературных источников. Влияние

данного метода на мясо яка при производстве мясопродуктов остается неизученным, поскольку соответствующие публикации не были обнаружены.

Разработка функциональных продуктов питания началась в Японии в 1980 гг. В настоящее время их доля в общем объеме производства продовольствия составляет около 1 %. Функциональные продукты обладают потребительскими свойствами, которые определяются их питательной ценностью, вкусом и положительным воздействием на организм [18]. Категория функциональных продуктов объединяет широкий перечень и включает практически все продукты природного происхождения, а также обогащенные необходимыми для здоровья питательными веществами. Компоненты функционального назначения должны иметь научно обоснованную оздоровительную эффективность, быть безвредными при интеграции в сбалансированное питание, не оказывать негативного влияния на пищевую ценность конечного продукта, иметь природное происхождение и возможность перорального употребления.

Создание функциональных продуктов питания достигается путем обогащения их нутриентами в процессе производства, а также применением сырья с заданным компонентным составом, что позволяет повысить оздоровительный эффект готового продукта [18]. Разработка подобных пищевых продуктов предусматривает совершенствование их состава. При создании новых рецептур необходимо включать ингредиент, определяющий функциональное назначение продукта, а именно – йод. При разработке мясных продуктов с профилактическим действием необходимо выбирать легкоусвояемый йод [19, 20]. Обогащение мясных продуктов йодом достигается путем добавления данного элемента в основное сырье и вспомогательные компоненты рецептуры, а также применения сырья и продуктов, уже содержащих йод. Примером служат мясные изделия, произведенные из мяса яка и с йодо-содержащей добавкой – ламинарией.

Мясо кыргызских яков трех лет первой категории, выращенных в Атбашинском районе Нарынской области (Кыргызская Республика), планируется использовать в виде основного компонента разрабатываемого продукта. Большая часть поголовья яков (28 818 голов) Кыргызстана сосредоточена в Нарынской области, что значительно превышает численность этих животных в других областях республики. Являясь экологически безопасным сырьем, мясо яков отличается высоким уровнем белка – от 20 до 23 % – и легко усвояемого железа (4,0–5,5 мг/100 г), необходимого организму человека. Это не просто продукт питания, а уникальное региональное сырье, эксклюзивный деликатес, сочетающий в себе пищевую ценность, экологичность и экономическую выгоду [21–23]. Мясо яка – ценный источник белка, не уступающий другим видам животного сырья. При этом его низкая калорийность делает продукт особенно востребованным для создания диетических и специализированных продуктов

питания, которые отвечают современным требованиям к здоровому питанию и потребительским предпочтениям. Для повышения содержания органического йода в мясном продукте в состав рецептуры планируется включить ламинарию.

Ламинария – эффективный концентратор йода: его количество достигает в среднем до 0,3 % от сухой массы. Исследования показали, что йод в ламинарии присутствует в составе комплексов с другими микроэлементами (селеном, железом, цинком и медью), что способствует его лучшему усвоению организмом. Содержание йода в морской капусте может значительно варьироваться – от 50 до 700 мкг/100 г – в зависимости от времени сбора. Биодоступность йода в ламинарии обусловлена его преобладанием в органической форме, прочно связанной с белками водорослей и легко усваиваемой организмом. Наряду с этим в составе водорослей присутствуют и неорганические формы йода (например йодида и йодата). Ламинария также содержит большое количество биоактивных веществ, в частности альгиновую кислоту в концентрации до 30 % от веса высушенного материала, полисахариды (ламинарин, маннит), моносахариды фруктозы и целый комплекс витаминов (в т. ч. витамины группы В, аскорбиновую кислоту и β -каротин), а также жизненно важные макро- и микроэлементы, клетчатку и др. Благодаря гидрофильной природе и способности к адсорбции, полисахариды морских водорослей могут связывать и выводить из кишечника как эндогенные, так и экзогенные токсины. Пищевые волокна в ламинарии снижают уровень холестерина, замедляют развитие атеросклеротических изменений и нормализуют функциональную активность желудочно-кишечного тракта [24].

Цель исследования – разработать новый продукт на основе мяса яка, обогащенный йодом растительного происхождения, способный восполнять дефицит микроэлемента в организме, а также комплексно оценить его минеральный состав, органолептические свойства и микробиологическую безопасность.

В связи с этим в рамках исследования поставлены следующие задачи:

- исследовать минеральный состав основного сырья – мяса яка и ламинарии (йодсодержащей добавки) – для оценки целесообразности их использования при производстве функционального продукта из мяса яка;
- изучить минеральный состав мясных изделий с добавлением ламинарии (опытная группа) и без нее (контроль), чтобы определить степень обогащения продукта йодом.

Объекты и методы исследования

Объекты исследования – образцы сушеной ламинарии (производство Китай), приобретенные в торговых точках Кыргызской Республики, а также мясо лопаточной части яков-быков (возраст – 3 года, первая категория упитанности), выращенных в Ат-Башинском районе Нарынской области (Кыргызская Республика). Согласно

результатам проведенных исследований, возраст, пол, упитанность и природно-климатические условия содержания животных определяют химический состав мяса. Наилучшим соотношением белков, жиров, влаги и сухих веществ обладает мясо, полученное от яков в возрасте от полутора до трех лет. По вкусовым качествам и технологическим свойствам оно превосходит мясо более взрослых животных (старше 3,5 лет) [25]. В качестве объектов изучения использовали шесть вариантов рулета, в состав которых добавляли ламинарию в количестве от 0,25 до 2,00 % от массы исходного сырья, а также контрольный образец, изготовленный без добавки. Изучен минеральный состав исходного сырья, модельных и контрольных образцов до и после термообработки. Кроме того, выявляли оптимальное количество йодсодержащей добавки (% от массы основного сырья).

Для определения минерального состава применяли метод атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой с использованием спектрометров ICAP 6000/7000/PRO (OrbiTrap Elite, США). Данный метод основан на количественном анализе спектра излучения, возникающего при термическом испарении пробы в электрической дуге, путем измерения интенсивности специфических спектральных линий. Концентрацию элемента устанавливали путем сопоставления интенсивности его спектральных линий в анализируемом образце с интенсивностью линий в эталонных пробах известного состава.

Микробиологические исследования выполнены в соответствии со стандартными методиками, предусматривающими определение общего количества мезофильных аэробных и факультативно-анаэробных микроорганизмов (КМАФАнМ), количества бактерий группы кишечных палочек (БГКП), а также наличия *Escherichia coli*, *Salmonella*, *Staphylococcus aureus* и сульфитредуцирующих клостридий.

Для оценки показателей безопасности выполняли подготовку проб для измерения токсичных элементов: ртути – колориметрическим методом, мышьяка – инверсионно-вольтамперометрическим методом, свинца и кадмия – методом пламенной атомной абсорбции. Анализы проводили по общепринятым стандартным методам. Контроль пестицидов осуществляли в соответствии с МУ 2142-80 «Методические указания по определению хлорорганических пестицидов в воде, продуктах питания, кормах и табачных изделиях методом хроматографии в тонком слое». Для определения предпочтительной дозировки йодсодержащей добавки (% от массы основного сырья) применяли органолептический метод по 9-балльной шкале.

Результаты и их обсуждение

Предварительные исследования показали, что на количественное содержание железа в мясе яка влияет высокогорный фактор. В связи с этим в качестве основного сырья использовано мясо яков, обитающих в условиях высокогорья Нарынской области Ат-Башинского

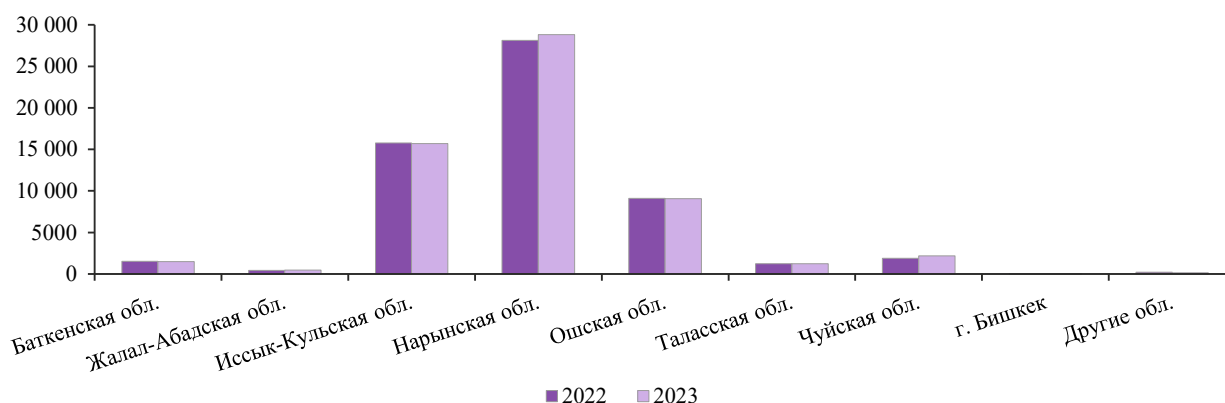


Рисунок 1. Поголовье яков за период 2022–2023 гг. (Кыргызская Республика), голов

Figure 1. Yak population in 2022–2023 (Kyrgyzstan), head

района (Кыргызская Республика), поскольку здесь локализовано наибольшее поголовье (рис. 1). Установлено, что содержание железа в мясе яка (4,35 мг/100 г) выше, чем в говядине (2,80 мг/100 г) [21]. Более высокое содержание железа в мясе яка по сравнению с говядиной делает его перспективным сырьем для производства мясопродуктов и способствует профилактике анемии, которая является серьезной проблемой среди населения Кыргызской Республики.

Анатомическое положение части туши влияет на концентрацию минеральных веществ в мясе, что необходимо учитывать при производстве мясных изделий. При создании нового продукта из мяса яка был применен классический метод производства вареного рулета². Предварительный анализ показал, что содержание йода в мясе яка варьировалось от 1,52 до 3,82 мкг/100 г в зависимости от анатомического положения части туши. Максимальный показатель зафиксирован в лопаточной части (3,82 мкг/100 г), минимальный – в поясничной (1,52 мкг/100 г); в остальных отрубях (тазобедренном, грудном, спинном и шейном) значения составили 2,06; 2,67; 2,29 и 3,38 мкг/100 г соответственно. На основании этого для производства нового мясного изделия использовано мясо лопаточной части яка.

Далее экспериментально исследован минеральный состав лопаточной части туши яка (рис. 2 и 3). Установлено низкое содержание йода в мясе яка – 3,82 мкг/100 г, тогда как содержание легкоусвояемого гемового железа составило 4350,00 мкг/100 г (4,35 мг/100 г).

Анализ данных, представленных на рисунке 2, также свидетельствует о том, что в лопаточной части мяса яка присутствуют такие необходимые для нормальной жизнедеятельности организма элементы, как цинк, медь, селен и др. В исследуемом сырье содержится больше фосфора и калия, но меньше кальция и натрия по сравнению с результатами, полученными ранее. Также

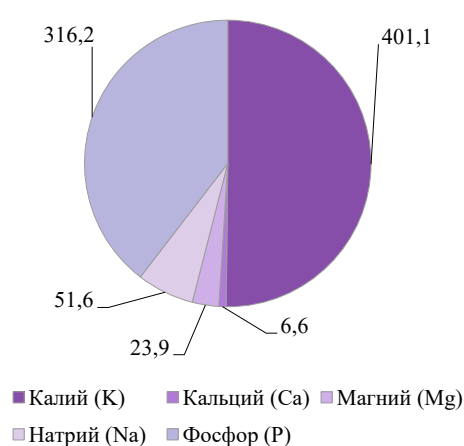


Рисунок 2. Макроэлементы лопаточной части туши яков, мг/100 г

Figure 2. Macronutrients in yak shoulder blade meat, mg/100 g

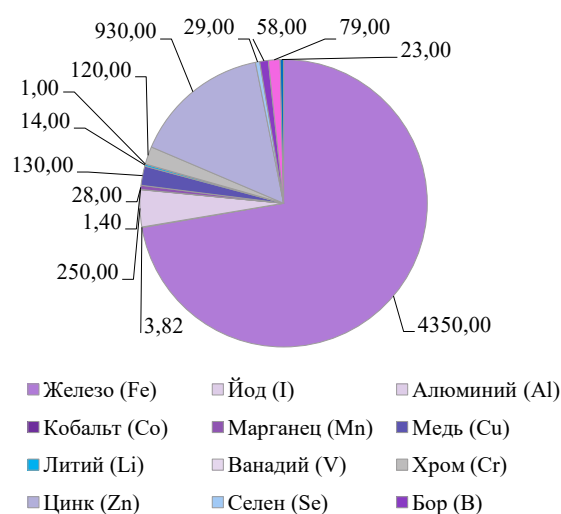


Рисунок 3. Микроэлементы лопаточной части туши яков, мкг/100 г

Figure 3. Microelements in yak shoulder blade meat, μg/100 g

² Юхневич К. П. Сборник рецептов мясных изделий и колбас. СПб.: Наука, 1998. 316 с.

отмечено повышенное содержание гемового железа и магния, что согласуется с имеющимися литературными сведениями [23].

Предварительная оценка минерального состава мяса выявила в нем низкое содержание йода. В связи с этим в качестве источника йода при производстве обогащенного мясного продукта выбрана сушеная ламинария китайского производства как доступная и эффективная йодсодержащая добавка, широко представленная в розничной сети страны. Ламинария в качестве обогатителя исследовалась и применялась как функциональная добавка многими учеными из разных стран.

Известна технология приготовления паштетов для профилактики дефицита йода. Для обогащения йодом использовались морские водоросли – ламинария и фукусы. Экспериментальные исследования показали улучшение состава паштетов: влажность возросла на 2,9–4,6 %, содержание белка увеличилось на 0,2–1,1 %, углеводов – на 1,9–3,0 %. Кроме того, содержание минеральных веществ в исследуемых образцах превысило контрольные значения в 1,5 раза. Обогащение паштетов привело к значительному увеличению концентрации йода и селена: в 4–7 раз по сравнению с исходными значениями, что свидетельствует о высокой биодоступности данных микроэлементов и потенциальной эффективности обогащенного продукта для компенсации дефицита йода и селена в организме.

Российские ученые предложили подход к созданию рубленых полуфабрикатов, предполагающий комбинацию мясного и рыбного сырья с добавлением морских водорослей. Данные продукты обогащены черноморской цистозирой и фукусами – морскими водорослями, обладающими соответствующими свойствами, и рекомендованы для восполнения дефицита селена и йода [26].

Для обогащения рациона биодоступным йодом предлагается использовать эламин, полученный из морской капусты. На его основе создан ассортимент полезных для здоровья продуктов, в состав которых входит 1 % эламина (в сухом виде) от массы продукта³.

В процессе производства вареных колбас в фарш вводят 66,14 г экстракта фукуса (морской водоросли) на каждые 100 кг сырья. Обогащение придает продукту профилактические свойства за счет содержания йода в количестве 0,098 мг/100 г [27]. Состав разработанных специализированных консервов был улучшен благодаря увеличению количества макро- и микроэлементов. В результате обработки исходного мясного сырья установлено существенное обогащение минерального состава: отмечается увеличение калия в 1,5–2,0 раза, кальция – в 7,5–13,0 раз, магния – в 3–4 раза, железа – в 3 раза и селена – в 15 раз.

³ Янчева М. А., Полуда А. В. Использование морских водорослей в производстве мясных кулинарных изделий. Конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Технология – 2007»: матер. Х всеукр. науч.-прак. конф. 2007. С. 42–46.

Введение экстракта ламинарии в фарш «Пикантный» и паштет «Диетический» привело к увеличению содержания йода до 29,7 и 60,6 мкг/100 г соответственно. Данные уровни йода покрывают 19,9 и 40,7 % от рекомендованной суточной нормы потребления йода.

Альгиновая кислота, присутствующая в ламинарии в виде солей кальция, натрия и других металлов, является ключевым фактором, определяющим ее высокую ценность. Она обладает радиозащитными свойствами, что определяет ее значительную роль. Разработанные консервированные продукты (паштет и фарш) содержат альгиновую кислоту в количестве 0,125 и 0,223 мг/100 г соответственно [28]. Содержание минеральных веществ в сушеной ламинарии, использованной при производстве нового продукта, представлено на рисунках 4 и 5.

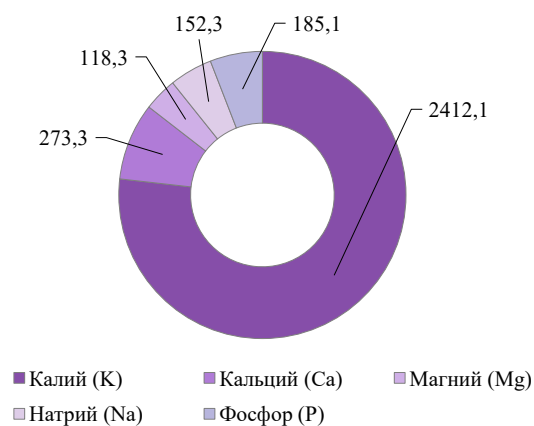


Рисунок 4. Макроэлементы ламинарии сушеной, мг/100 г

Figure 4. Macronutrients in dried kelp, mg/100 g

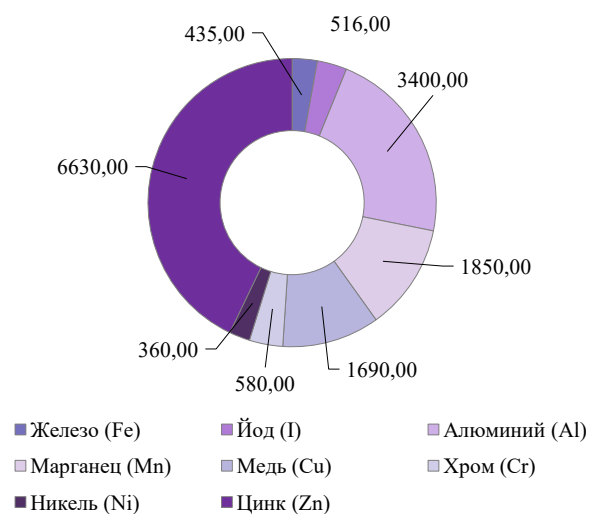


Рисунок 5. Микроэлементы ламинарии сушеной, мкг/100 г

Figure 5. Microelements in dried kelp, µg/100 g

Сушеная ламинария является концентратом органического йода. В мясе яка содержание йода очень низкое – 3,82 мкг/100 г, тогда как в ламинарии сушеной содержится 516,00 мкг/100 г, что делает возможным использование ее в качестве компонента, придающего функциональные свойства готовому продукту.

До разработки технологии нового функционального продукта – рулета из мяса яка – было определено количество добавляемой ламинарии.

Для контрольного образца использовали рецептуру и технологию классического вареного рулета, в кото-

ром вместо свинины применяли мясо яка и ламинарию (табл. 1, рис. 6). С учетом технологического процесса производства вареного рулета полутуши яка раздвигали, выделяли лопаточную часть, которую подвергали обвалке. Полученные куски мяса жиловали, удаляя соединительную ткань от мышечной. Далее направляли на шприцевание рассолом 10 % от массы сырья и выдерживали до 72 ч. Куски мяса направляли на массирование.

Мясо яка уникально по составу, отличается от других видов мяса своей структурой и характеризуется

Таблица 1. Рецепт вареного рулета

Table 1. Yak meatloaf formulation

Наименование	Норма расхода, кг/100 кг
Сырье несоленое (свинина – лопаточная часть без костей, сухожилий и хрящей, цельномышечная)	100,0
Специи и пряности на заливочный рассол	
нитритно-посолочная смесь (НПС)	6,0
ламинария	1,5

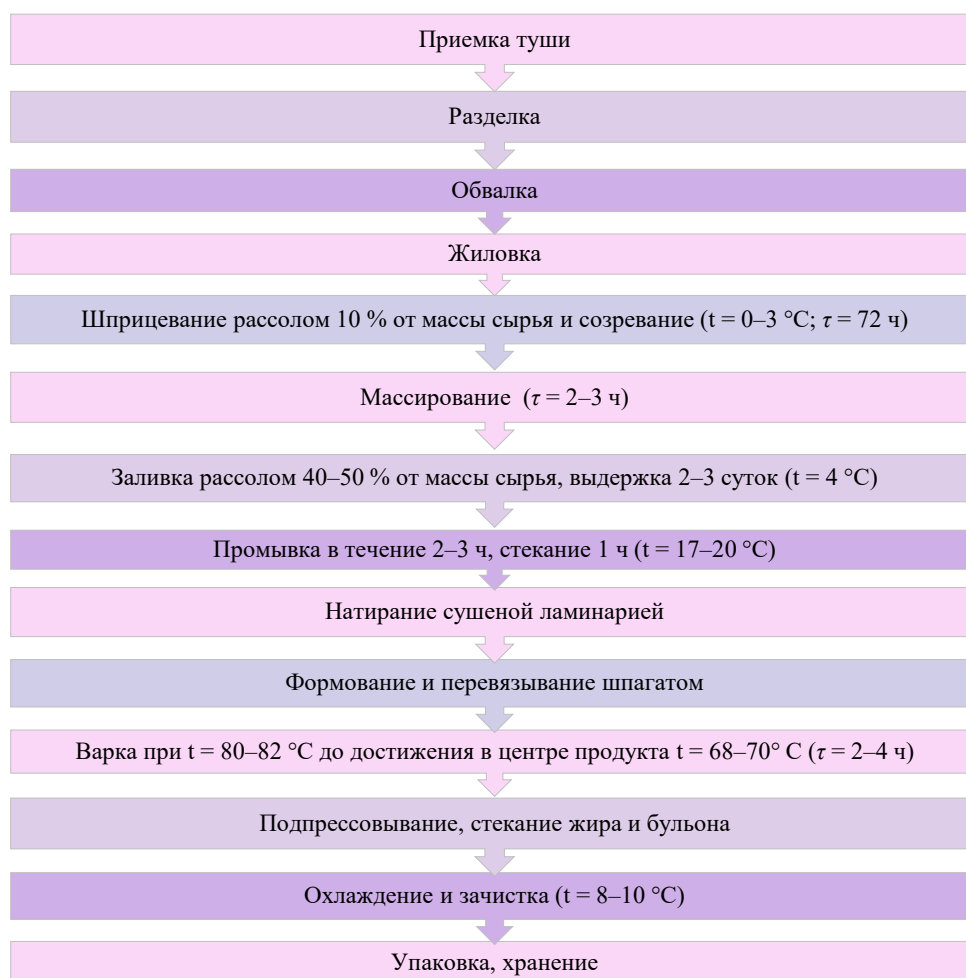


Рисунок 6. Технологическая схема производства вареного рулета

Figure 6. Technological scheme of yak meatloaf production

некоторой жесткостью, что, по-видимому, связано с физическими нагрузками, сопряженными с особенностями обитания животного в условиях высокогорья. Чтобы придать сырью с грубыми мышечными волокнами более нежную структуру и улучшить его способность связывать воду, в мясном производстве применяются различные технологии. В Кыргызской Республике на предприятиях мясной промышленности при изготовлении изделий из ветчины в качестве основного метода обработки используют массирование.

После массирования заливали рассолом 40–50 % от массы сырья и выдерживали 2–3 суток при температуре 4 °С. Под воздействием соли в мясе активизируются биохимические процессы, которые обогащают его веществами, придающими характерный вкус и улучшающими структуру [29]. Для равномерного распределения соли по поверхности мясо промывали в течение 2–3 ч, затем давали стечь в течение 1 ч. Перед формованием производили натирку сушеной ламинарией, предварительно мелкоизмельченной в виде порошка, в разных пропорциях. После этого куски мяса скручивали в виде рулета, перевязывали шпагатом, подвергали тепловой обработке, охлаждали, упаковывали и направляли на хранение.

Что касается количества добавляемой ламинарии, то оптимальная дозировка была определена путем

выработки шести опытных образцов с внесением разного количества добавки, а также контрольного образца без ламинарии. Процентное содержание ламинарии в опытных образцах варьировалось от 0,25 до 2,50 % от массы сырья. Образцы рулетов с различным содержанием ламинарии представлены в таблице 2.

Для определения оптимальной дозировки йодсодержащей добавки ламинарии была создана дегустационная комиссия. Технологические свойства мяса и мясoproductов формируются под влиянием таких факторов, как содержание питательных веществ, вкусовые характеристики, органолептические показатели, а также биологическая и энергетическая ценность. Вкус мяса определяется его нежностью, сочностью, ароматом, текстурой мышечной ткани и наличием жировых прослоек (мраморности) [30]. Органолептический метод, основанный на сенсорном восприятии, играет важную роль в оценке качества мяса и мясoproductов. Этот метод, ориентированный на потребителя, позволяет получить наиболее полное представление о вкусовых характеристиках готового продукта [32]. Оценивали показатели качества: внешний вид, цвет, консистенция, запах и вкус. Для органолептического анализа использовали 9-балльную шкалу. На рисунках 7 и 8 представлены результаты органолептических исследований, отображающие средние показатели.

Таблица 2. Компоненты для рулетов из мяса яков

Table 2. Yak meatloaf: Ingredients

Наименование	Образцы						
	Контроль	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	№ 6
Мясо яка посоленное (лопаточная часть), кг	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Ламинария, кг	–	0,25	0,50	1,00	1,50	2,00	2,50

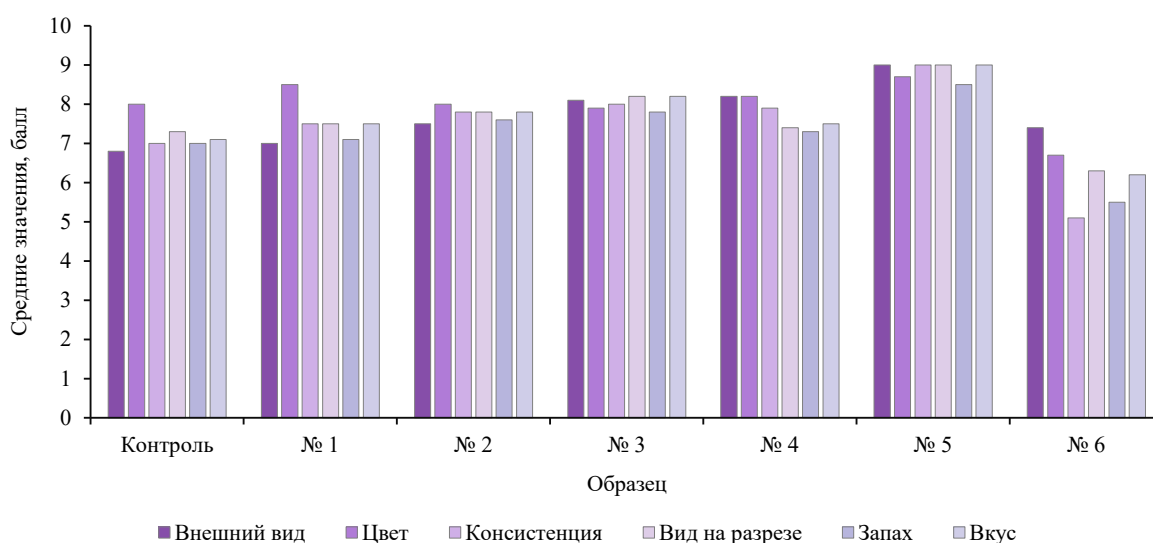


Рисунок 7. Результаты органолептического анализа изготовленных рулетов

Figure 7. Sensory assessment of yak meatloaf

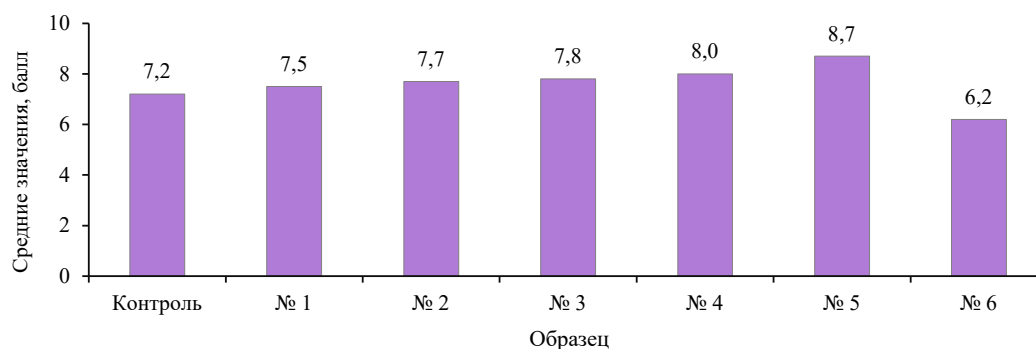


Рисунок 8. Средние значения органолептического анализа изготовленных рулетов

Figure 8. Assessment of yak meatloaf: Mean values

Таблица 3. Содержание минеральных веществ в готовом продукте

Table 3. Mineral content in the finished product

Наименование	Продукт			
	Без ламинарии		С ламинарией	
	До тепловой обработки	После тепловой обработки	До тепловой обработки	После тепловой обработки
Макроэлементы, мг/100 г				
Калий (K)	406,4	386,2	468,3	457,0
Кальций (Ca)	29,7	18,2	58,4	36,4
Магний (Mg)	22,5	18,5	31,5	19,2
Натрий (Na)	1608,3	1035,5	1900,6	1438,6
Фосфор (P)	392,8	371,1	396,2	377,5
Микроэлементы, мкг/100 г				
Железо (Fe)	4100,0	2610,0	7290,0	5030,0
Йод (I)	5,2	4,9	29,5	20,9
Алюминий (Al)	2320,0	2193,2	2560,0	2450,0
Кобальт (Co)	2,8	2,0	4,0	3,0
Марганец (Mn)	110,6	90,0	180,0	120,0
Медь (Cu)	130,5	97,0	150,0	110,0
Литий (Li)	10,8	9,0	13,0	11,0
Ванадий (V)	1,6	1,0	8,0	5,0
Хром (Cr)	120,3	80,0	210,0	130,0
Цинк (Zn)	4620,3	4550,0	4700,0	4680,0
Селен (Se)	58,9	53,0	60,0	55,0
Бор (B)	98,1	90,0	130,0	120,0
Никель (Ni)	81,2	50,0	100,0	70,0
Олово (Sn)	36,7	30,0	50,0	40,0

Анализ органолептических свойств рулетов показал, что наиболее оптимальными оказались образцы № 4 и № 5, которые продемонстрировали высокие вкусовые качества и полностью соответствовали установленным стандартам. Единственным недостатком было наличие запаха морской капусты. На основе органолептической оценки выбран образец № 5, показавший наилучшие результаты.

После того как оптимальное содержание ламинарии в рецептуре было установлено на уровне 1,5 % от массы исходного сырья, приступили к изготовлению рулетов.

Разработанная технология имела отличия от общепринятой (рис. 6). После посола и созревания куски мяса натерли сушеной ламинарией, для равномерного ее распределения по всему объему их подвергали масированию и последующей обработке. Контрольный образец изготавливали без ламинарии.

Особый интерес представляло содержание йода и железа в готовом продукте в двух вариантах: с ламинарией и без. В связи с этим был исследован минеральный состав вареного рулета из мяса для обоих вариантов (табл. 3).

В изделии с добавлением ламинарии содержание йода составляет 20,9 мкг/100 г, тогда как в контрольном образце без ламинарии – только 4,9 мкг/100 г. Таким образом, рулет, обогащенный ламинарией, представляет собой перспективный продукт для профилактики заболеваний щитовидной железы, обусловленных недостатком йода в рационе. В готовом продукте с ламинарией содержание железа составило 5003,0 мкг/100 г (5,03 мг/100 г), а в рулете без ламинарии – 2610,0 мкг/100 г (2,61 мг/100 г). Данные по степени покрытия суточной нормы потребления йода и железа представлены в таблице 4.

Согласно полученным данным, 100 г готового продукта содержат 5,03 мг железа, что обеспечивает 27,94 % от суточной нормы потребления этого вещества человеком, а также 13,93 % суточной потребности в йоде. Следовательно, готовый рулет относится к продуктам с функциональными свойствами.

Технический регламент Таможенного союза «О безопасности мяса и мясных продуктов» устанавливает требования к показателям безопасности. Безопас-

ность пищевых продуктов заключается в их способности не вызывать у человека токсических, канцерогенных, мутагенных, аллергенных и других нежелательных реакций.

Для обеспечения безопасности потребителей вся мясная продукция на финальном этапе выпуска подвергается строгому контролю: проверяется наличие токсичных элементов и пестицидов (табл. 5), а также проводится микробиологическая экспертиза (табл. 6).

Полученные результаты свидетельствуют о том, что разработанный продукт отвечает всем требованиям по безопасности готового продукта. Все вышеперечисленные показатели свидетельствуют о целесообразности использования мяса яков как основного сырья для выработки вареного рулета, обогащенного ламинарией.

Выводы

Ввиду значительной распространенности заболеваний щитовидной железы и железодефицитной анемии, обусловленных дефицитом йода и железа, среди

Таблица 4. Степень покрытия суточной нормы

Table 4. The degree of coverage of the daily allowance

Наименование	Суточная потребность (Нормы ФП МР 2.3.1.2432-08)	Содержание элемента в 100 г готового продукта	% покрытия суточной нормы
Железо (Fe), мг	18	5,03	27,94
Йод (I), мкг	150	20,90	13,93

Таблица 5. Безопасность вареного рулета

Table 5. Safety test

Показатель	Вареный рулет	Допустимые уровни по ТР ТС 021/2011
Токсичные элементы, мг/кг		
свинец	0,100	0,500
мышьяк	0,050	0,100
кадмий	0,010	0,050
ртуть	0,004	0,030
Пестициды, мг/кг		
сумма изомеров ГХЦГ (гексахлорциклогексан) α -, β -, γ -	0,050	0,100
ДДТ (дихлордифенилтрихлорэтан) и его метаболиты (4,4-ДДД и 4,4-ДДЕ)	0,050	0,100

Таблица 6. Микробиологические показатели вареного рулета

Table 6. Microbiological parameters

Показатель	Допустимые уровни (ТР ТС 021/2011, ТР ТС 034/2013)	Результат
Бактерии группы кишечной палочки (колиформы) в 1,0 г продукта	не допускаются	не обнаружены
Патогенные бактерии, в т. ч. сальмонеллы и <i>Listeria monocytogenes</i> , в 25 г продукта	не допускаются	не обнаружены
<i>Staphylococcus aureus</i> в 1,0 г продукта	не допускаются	не обнаружены
Сульфитредуцирующие клостридии в 0,01 г продукта	не допускаются	не обнаружены

наиболее уязвимых слоев населения Кыргызской Республики и большинства стран Центральной Азии актуализируется задача разработки и поиска эффективных мер профилактики и терапии данных патологий. Перспективным направлением представляется создание обогащенных продуктов питания.

Для преодоления данного вызова требуется поиск и освоение новых источников сырья. В этом контексте возрастает значимость продуктов и получаемых ресурсов, способных обеспечить максимальный уровень безопасности конечной продукции. Данная тенденция подтверждается растущей популярностью мяса яка, поголовье которого демонстрирует устойчивый рост.

В соответствии с поставленной целью исследования минеральный состав основных рецептурных компонентов, определены органолептические и микробиологические показатели готового вареного рулета.

Предварительное исследование по определению концентрации йода в различных частях туши яка показало, что максимальное значение (3,82 мкг/100 г) выявлено в лопаточной части. Также был проанализирован минеральный состав йодсодержащей добавки – ламинарии, в которой обнаружено высокое содержание органического йода – 516,00 мкг/100 г. В связи с этим использование лопаточной части туши яка и ламинарии, богатой органическим йодом и железом, было признано целесообразным для производства мясного рулета с целью получения функционального продукта. Установлено, что добавление ламинарии в количестве 1,5 % от массы сырья обеспечивает содержание йода в готовом продукте на уровне 20,9 мкг/100 г. Также подтверждена целесообразность использования мяса яка в качестве основного сырья для вареного рулета благодаря высокому содержанию гемового железа, необходимого для профилактики анемии. В резуль-

тате содержание этого микроэлемента в готовом продукте достигло 5003,0 мкг/100 г (5,03 мг/100 г).

Определены органолептические показатели готового продукта, которые продемонстрировали высокие вкусовые качества и полное соответствие установленным стандартам. Микробиологические параметры и показатели безопасности готового продукта свидетельствуют о том, что разработанный продукт отвечает всем требованиям безопасности.

При исследовании минерального состава вареного рулета с ламинарией было выявлено высокое содержание в нем как микро-, так и макроэлементов. Содержание железа увеличилось на 18,49 %, а йода – в 4 раза по сравнению с контрольным образцом. В 100 г готового рулета содержится 5,03 мг/100 г железа, что покрывает 27,94 % от рекомендуемой суточной нормы, и 20,9 мкг/100 г йода (13,93 % суточной потребности), что позволяет отнести данный продукт к категории функциональных и рекомендовать его для людей с заболеваниями, связанными с нехваткой йода и железа.

Критерии авторства

Авторы в равной степени участвовали в подготовке и написании статьи.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution

All authors contributed equally to the study conception, research design, and manuscript preparation.

Conflict of interest

The authors state that there is no conflict of interest.

Список литературы / References

1. Чагина Е. А., Турмова Е. П., Козырева О. Р., Воропаева А. В. Патогенетическая роль йода в организме человека. International journal of professional science. 2022. № 11–1. С. 97–104. [Chagina EA, Turmova EP, Kozyreva OR, Voropaeva AV. The pathogenetic role of iodine in the human body. International Journal of Professional Science. 2022;11–1:97–104. (In Russ.)] https://doi.org/10.54092/25421085_2022_111_97
2. Ханахмедова К. Ш., Сулейманова Р. Г., Исаханова М. М., Хидириева З. М., Магомедова И. М. Структура распространенности болезней щитовидной железы среди городского и сельского населения. Вестник новых медицинских технологий электронное издание. 2022. Т. 16. № 2. С. 66–70. [Hanahmedova KSH, Suleymanova RG, Isahanova MM, Khidirieva ZM, Magomedova IM. The structure of the prevalence of forms of thyroid gland disease. Journal of New Medical Technologies, eEdition. 2022;16(2):66–70. (In Russ.)] <https://doi.org/10.24412/2075-4094-2022-2-2-1>
3. Абдулхабирова Ф. М., Безлепкина О. Б., Бровин Д. Н., Вадина Т. А., Мельниченко Г. А. и др. Клинические рекомендации «Заболевания и состояния, связанные с дефицитом йода». Проблемы эндокринологии. 2021. Т. 67. № 3. С. 10–25. [Abdulkhairova FM, Bezlepikina OB, Brovin DN, Vadina TA, Melnichenko GA, et al. Clinical practice guidelines “Management of iodine deficiency disorders”. Problems of Endocrinology. 2021;67(3):10–25. (In Russ.)] <https://doi.org/10.14341/probl12750>
4. Lazarus JH. The importance of iodine in public health. Environmental Geochemistry and Health. 2015;37(4):605–618. <http://dx.doi.org/10.1007/s10653-015-9681-4>
5. Трошина Е. А. Устранение дефицита йода – забота о здоровье нации. Эскурсы в историю, научные аспекты и современное состояние правового регулирования проблемы в России. Проблемы эндокринологии. 2022. Т. 68. № 4.

- C. 4–12. [Troshina EA. Elimination of iodine deficiency is a concern for the health of the nation. An excursion into the history, certain aspects and features of the regulation of the legal regulation of the problem in Russia. *Problems of Endocrinology*. 2022;68(4):4–12. (In Russ.)] <https://doi.org/10.14341/probl13154>
6. Andersson M, Karumbunathan V, Zimmermann MB. Global iodine status in 2011 and trends over the past decade. *The Journal of Nutrition*. 2012;142:744–750. <https://doi.org/10.3945/jn.111.149393>
7. Орозбаева Ж. М. Распространение эндемического зоба у жителей г. Жалалабад за 2013–2015 годы и его профилактика. Актуальные научные исследования в современном мире. 2017. № 3–3. С. 96–101. [Orozbaeva ZhM, Distribution of endemic goiter among residents of Jalalabad for 2013–2015 and its prevention. *Actual Scientific Research in the Modern World*. 2017;3–3:96–101. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/YKGACR>
8. Черняев С. И. О взаимозависимой роли йода, селена и железа в профилактике алиментарных заболеваний. *Sciences of Europe*. 2016. № 5 (5). С. 59–62. [Chernyaev SI. On the interdependent role of iodine, selenium and iron in the prevention of nutritional diseases. *Sciences of Europe*. 2016;5(5):59–62. (In Russ.)]
9. Гуринович Г. В., Хренов В. А., Патракова И. С., Патшина М. В. Исследование влияния способов тепловой обработки на физико-химические свойства говядины в зависимости от технологии созревания. *Пищевые системы*. 2022. № 4. Т. 4. С. 28–33. [Gurinovich GV, Khrenov VA, Patrakova IS, Patshina MV. Studying an effect of thermal treatment methods on physico-chemical properties of beef depending on aging technology. *Food Systems*. 2022;4(4):28–33. (In Russ.)] <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2022-5-4-376-382>
10. Dominguez-Hernandez E, Salaseviciene A, Ertbjerg P. Lowtemperature long-time cooking of meat: Eating quality and underlying mechanisms. *Meat Science*. 2018;143:104–113. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2018.04.032>
11. Mortensen LM, Frost MB, Skibsted LH. Long-time low-temperature cooking of beef: Three dominant time-temperature behaviours of sensory properties. *Flavour*. 2015;3:2. <https://doi.org/10.1186/2044-7248-4-2>
12. Cui ZK, Yan H, Manoli T, Mo HZ, Bi J, *et al.* Advantages and challenges of sous vide cooking. *Food Science and Technology Research*. 2021;27(1):25–34. <https://doi.org/10.3136/fstr.27.25>
13. Родионова Н. С., Попов Е. С. Sous-vide обработка мелкокусковых полуфабрикатов из говядины: режимы и показатели качества. *Пищевая промышленность*. 2015. № 10. С. 32–34. [Rodionova NS, Popov ES. Sous-vide processing of small-grain semi-finished beef products: Modes and quality indicators. *The Food Industry*. 2015;(10):32–34. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/ULVWRX>
14. Радченко М. В. Исследование влияния длительной низкотемпературной тепловой обработки на качественные характеристики вареных продуктов из свинины с различным ходом автолиза: дис. ... канд. техн. наук: 05.18.04. Орел, 2016. 218 с. [Radchenko MV. Effect of prolonged low-heat treatment on the quality of boiled pork products with different autolysis processes: *Cand. Tech. Sci. Diss.*: 05.18.04. Orel; 2016. 218 p. (In Russ.)]
15. Salaseviciene A, Vaiciulyte-Funk L, Koscelkovskienė I. Impact of low temperature, prolonged time treatment and vacuum depth on the porcine muscle quality and safety: *Proceedings 9th Baltic Conf. on Food Science and Technology «Food for Consumer Well-Being»*. Jelgava, 2014. pp. 333–335.
16. Де-Соуза Л. Д. К. Совершенствование технологии тепловой обработки предварительно вакуумированных пищевых систем на основе круп, овощей и мяса птицы: дис. ... канд. техн. наук: 05.18.01. Воронеж, 2013. 144 с. [De Souza LDK. Improving the technology of heat treatment of pre-vacuumed food systems based on cereals, vegetables, and poultry: *Cand. Tech. Sci. Diss.*: 05.18.01. Voronezh, 2013. 144 p. (In Russ.)]
17. Фофанова Т. С. Технология су-вид – некоторые аспекты качества и микробиологической безопасности. Теория и практика переработки мяса. 2018. № 3. С.59–68. [Fofanova TS. Su-vide technology – several aspects of quality and microbiological safety. *Theory and Practice of Meat Processing*. 2018;3(1):59–68. (In Russ.)] <https://doi.org/10.21323/2414-438X-2018-3-1-59-68>
18. Борисова А. В., Шаярова М. В., Шишкина Н. Ю. Функциональные продукты питания: связь между теорией, производством и потребителем. Новые технологии. 2021. Т. 17. № 1. С. 21–32. [Borisova AV, Shayarova MV, Shishkina NYu. Functional food: Relationship between the theory, the production and a consumer. *New Technologies*. 2021;17(1):21–32. (In Russ.)] <https://doi.org/10.47370/2072-0920-2021-17-1-21-32>
19. Trumbo PR. FDA regulations regarding iodine addition to foods and labeling of foods containing added iodine. *The American Journal of Clinical Nutrition*. 2016;104:864–867. <https://doi.org/10.3945/ajcn.115.110338>
20. Антипова Л. В., Бессонова Л. П., Ибрагимова З. Р. Применение йодис-концентрата в получении йодированных мясных продуктов. Все о мясе. 2014. № 3. С. 32–35. [Antipova LV, Bessonova LP, Ibragimova ZR. The use of iodis concentrate in the production of iodized meat products. *All About Meat*. 2014;(3):32–35. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/SHMXTF>
21. Тамабаева Б. С., Абакирова Э. М. Разработка рецептуры и технологии продуктов из мяса яка. Наука, общество, технологии: проблемы и перспективы взаимодействия в современном мире. Под ред. Ивановской И. И. Петрозаводск: Новая наука, 2022. С. 255–298. [Tamabaeva BS, Abakirova EM. Formulation and technology development of yak meat products. *Science, society, technology: Problems and prospects of interaction in the modern world*. In: Ivanovskaya II, editor. Petrozavodsk: A New Science; 2022. pp. 255–298. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/CCFEBV>
22. Zhang Q, Kakade A, Jing X. Insights into the merits and market potential of yak meat. *Animal Frontiers*. 2023;13:24–31. <https://doi.org/10.1093/af/vfad054>

23. Баженова Б. А., Забалуева Ю. Ю., Данилов М. Б., Вторушина И. А., Бадмаева Т. М. Мясо яков, как перспективное сырье для производства мясопродуктов. *Техника и технология пищевых производств*. 2018. Т. 48. № 3. С. 16–33. [Bazhenova BA, Zabalueva YuYu, Danilov MB, Vtorushina IA, Badmaeva TM. Yak meat as a lucrative raw material for meat products. *Food Processing: Techniques and Technology*. 2018;48(3):16–33. (In Russ.)] <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2018-3-16-33>
24. Стаценко Е. С. Разработка технологии кулинарного изделия с использованием обогащающей добавки на основе сои и ламинарии. *Достижения науки и техники АПК*. 2020. Т. 34. № 8. С. 107–110. [Statsenko ES. Development of culinary product technology using enriching additives based on soy and kelp. *Achievements of Science and Technology of the Agroindustrial Complex*. 2020;34(8):107–110. (In Russ.)] <https://doi.org/10.24411/0235-2451-2020-10819>
25. Абдыкеримов А. А., Самыкбаев А. К., Бекжанова Э. А., Искембаева А. М., Буйлашев У. Т. Яководство Кыргызстана. *Вестник Кыргызского национального аграрного университета им. К. И. Скрябина*. 2016. № 1. С. 66–70. [Abdykerimov AA, Samykbaev AK, Bekzhanova EA, Iskembayeva AM, Buylashev UT. Yak of the Kyrgyz Republic. *Bulletin of the Kyrgyz National Agrarian University named after K.I. Scriabin*. 2016;(1):66–70. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/WBWFBSB>
26. Агунова Л. В. Анализ производства мясных продуктов функционального назначения для коррекции йододефицитных состояний. *Восточный Европейский журнал передовых технологий*. 2015. № 2. С. 9–14. [Agunova LV. Analysis of the production of functional meat products for the correction of iodine deficiency conditions. *Eastern European Journal of Advanced Technologies*. 2015;(2):9–14. (In Russ.)] <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.39693>
27. Красовская Е.С., Почичкая И. М., Алексеенко М. С. Изучение биологически активных веществ, позволяющих прогнозировать функциональные свойства паст и паштетов рыбных с фукусом. *Пищевая промышленность: наука и технологии*. 2024. Т. 17. № 3. С. 76–85. [Krasovskaya ES, Pochitskaya IM, Alekseenko MS. The study of biologically active substances that make it possible to predict the functional properties of fish pastes and pates with fucus. *Food Industry: Science and Technology*. 2024;17(3):76–85. (In Russ.)]
28. Толкунова Н. Н., Бидюк А. Я., Свергуненко С. Л. Экстракт фукуса – новое решение проблемы йодной недостаточности. *Пищевая промышленность*. 2004. № 2. С. 74–75. [Tolkunova NN, Bidyuk AY, Svergunenko SL. Fucus extract is a new solution to the problem of iodine deficiency. *The Food Industry*. 2004;(2):74–75. (In Russ.)]
29. Тамабаева Б. С., Абакирова Э. М. Разработка функционального продукта из мяса яка. *Ползуновский вестник*. 2023. № 4. С. 127–132. [Tamabaeva BS, Abakirova EM. Development of functional product from yak meat. *Polzunovskiy Vestnik*. 2023;(4):127–132. (In Russ.)] <https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2023.04.016>
30. Зеленев Г. Н. Органолептическая оценка качества говядины мясных телок различных генотипов. *Вестник Ульяновской сельскохозяйственной академии*. 2016. № 2. С. 123–126. [Zelenov GN. Organoleptic assessment of beef quality of meat heifers of various genotypes. *Bulletin of the Ulyanovsk Agricultural Academy*. 2016;2;123–126. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/WEZYVXX>
31. Левахин В. И., Попов В. В., Сиразетдинов Ф. Х. Новые приемы высокоэффективного производства говядины. М.: Вестник РАСХН, 2011. 412 с. [Levakhin VI, Popov VV, Sirazetdinov FH. New methods of highly efficient beef production. Moscow: Bulletin of the Russian Academy of Agricultural Sciences; 2011. 412 p. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/QLCIXT>

Дополнительная информация об авторах / Additional information about the authors

Тамабаева Бибикуль Сулеевна / Bibikul S. Tamabaeva ORCID 0000-0002-0892-2363; eLIBRARY SPIN 6199-5872
Кыдыралиев Нурудин Абдыназарович / Nurudin A. Kydyraliev ORCID 0000-0002-6168-8772; eLIBRARY SPIN 1211-9498
Абакирова Элиза Майрамбековна / Eliza M. Abakirova ORCID 0009-0004-4662-8271; eLIBRARY SPIN 2156-8302
Азисова Мунара Азисовна / Munara A. Azisova ORCID 0009-0003-2397-4289; eLIBRARY SPIN 4379-1902

<https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-2-2643>
<https://elibrary.ru/QPYNFJ>

Оригинальная статья
<https://fptt.ru>

Исследование влияния глицина на термостабильность фолиевой кислоты в процессе хлебопечения



М. Е. Лобзанова, В. П. Юстратов^{ID}, С. А. Иванова*^{ID}

Кемеровский государственный университет^{ROR}, Кемерово, Россия

Поступила в редакцию: 03.03.2026

Принята после рецензирования: 20.04.2026

Принята к публикации: 05.05.2026

*e-mail: pavvm2000@mail.ru

© М. Е. Лобзанова, В. П. Юстратов, С. А. Иванова, 2026



Аннотация.

В современных условиях проблема дефицита фолиевой кислоты (витамин В₉) в рационе населения приобретает особую актуальность, поскольку недостаточное потребление натуральных продуктов и потери пищевых веществ при термической обработке приводят к дефициту нутриентов. Цель исследования – определить влияние глицина на термическую стабильность свободной фолиевой кислоты в составе рецептуры обогащенного хлебобулочного изделия в процессе выпекания. Объектами исследования выступали образцы, имитировавшие хлебобулочные изделия, приготовленные в лабораторных условиях из муки пшеничной хлебопекарной высшего сорта, питьевой воды, соли, фолиевой кислоты, сахара и глицина. Количественный анализ содержания фолиевой кислоты в образцах проводили методом высокоэффективной жидкостной хроматографии.

Установлено, что добавление глицина в тесто существенно повлияло на сохранность фолиевой кислоты при термической обработке. В образцах без глицина потери после термообработки составили более 82 %, тогда как в образцах с глицином – не более 10 %. Растворение фолиевой кислоты с глицином в воде и внесение полученного раствора в смесь муки и других сухих компонентов позволило справиться с неравномерностью распределения фолиевой кислоты в муке.

Совместное применение фолиевой кислоты с глицином способствовало повышению сохранности витамина при выпечке, что имеет важное практическое значение для производства обогащенных продуктов питания. Результаты исследования демонстрируют возможность создания более эффективных технологий обогащения хлебобулочных изделий фолиевой кислотой, что может способствовать решению проблемы дефицита витамина в питании населения.

Ключевые слова. Фолиевая кислота, солублилизованная аминокислота, термостабильность, хлебобулочные изделия, ВЭЖХ

Для цитирования: Лобзанова М. Е., Юстратов В. П., Иванова С. А. Исследование влияния глицина на термостабильность фолиевой кислоты в процессе хлебопечения. Техника и технология пищевых производств. 2026. Т. 56. № 2. С. 368–379. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-2-2643>

Effect of Glycine on Thermal Stability of Folic Acid during Baking



Marina E. Lobzanova, Vladimir P. Yustratov^{ID}, Svetlana A. Ivanova*^{ID}

Kemerovo State University^{ROR}, Kemerovo, Russia

Received: 03.03.2026
Revised: 20.04.2026
Accepted: 05.05.2026

*e-mail: pavvm2000@mail.ru
© M.E. Lobzanova, V.P. Yustratov, S.A. Ivanova, 2026



Abstract.

Folic acid (vitamin B₉) deficiency is a significant health issue because excessive food processing often leads to nutritional deficiencies. This article describes the effect of glycine on the thermal stability of folic acid in bakery products. The research featured bakery samples made from high-grade wheat flour, drinking water, salt, folic acid, sugar, and glycine. Quantitative analysis of the folic acid was performed using High-Performance Liquid Chromatography (HPLC). Glycine significantly affected the preservation of folic acid during baking. The samples without glycine lost 82% or more of their folic acid after heat treatment, whereas the samples with glycine lost 10% or less. An aqueous solution of folic acid and glycine mixed with flour and other solids improved the distribution of folic acid throughout the dough. Glycine significantly increased the preservation of folic acid during baking, thereby facilitating the production of fortified foods. This method may yield more effective technologies for producing bakery goods fortified with folic acid to eliminate its deficiency in the diet. Future research will determine the nature and mechanism of the effect that glycine exerts on the properties of folic acid.

Keywords. Folic acid, solubilized aminoacetic acid, thermal stability, bakery products, High-Performance Liquid Chromatography (HPLC)

For citation: Lobzanova ME, Yustratov VP, Ivanova SA. Effect of Glycine on Thermal Stability of Folic Acid during Baking. Food Processing: Techniques and Technology. 2026;56(2):368–379. (In Russ.) <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-2-2643>

Введение

Качество жизни напрямую зависит от здоровья, которое определяется правильным питанием с достаточным количеством макро- и микроэлементов. Современный рацион часто не обеспечивает необходимую норму нутриентов, в т. ч. фолиевой кислоты, из-за снижения потребления натуральных продуктов (зелень, бобовые, орехи) и потерь при обработке пищи [1–3].

Фолиевая кислота (витамин B₉) – один из важнейших водорастворимых витаминов группы фолатов, критически значимый для метаболизма человека и являющийся специфическим фактором роста для некоторых микроорганизмов. В организме животных фолиевая кислота вырабатывается кишечными бактериями в небольших количествах [4–6]. Витамин B₉ участвует в ключевых процессах переноса углерода, необходимых для синтеза ДНК и метилирования [7, 8]. ВОЗ рекомендует потреблять 400–600 мкг фолиевой кислоты в сутки взрослым и беременным женщинам [9]. Дефицит этого витамина связан с тяжелыми заболеваниями: дефектами нервной трубки, сердечно-сосудистыми, цереброваскулярными и нейродегенеративными заболеваниями, а также с мегалобластной анемией и некоторыми формами рака [10, 11].

Фолиевая кислота представляет собой кристаллическое соединение желтого цвета без вкуса и запаха, относящееся к водорастворимым витаминам группы В [4]. С химической точки зрения она является гетероциклическим соединением на основе 4-[(птеридин-6-илметил)амино]бензойной кислоты, конъюгированной с одной или несколькими единицами глутамата (рис. 1).

Молекула фолиевой кислоты (птероилглутаминовая кислота) состоит из трех структурных компонентов: птерина (птеридиновое кольцо), п-аминобензойной кислоты и глутаминовой кислоты [4, 12]. Каждый из этих компонентов в отдельности не обладает витаминной активностью (рис. 2).

Эффективным решением стала программа обязательного обогащения продуктов питания фолиевой кислотой [8]. Дефицит витамина диагностируется при уровне менее 6,8 нмоль/л в сыворотке крови и менее 226,5 нмоль/л в эритроцитах, от чего страдает более 40 % женщин в мире независимо от уровня доходов. В 93 странах проводится обогащение пшеничной муки фолиевой кислотой, причем в 81 из них внедрены программы обязательного обогащения муки этим витамином для профилактики дефектов нервной трубки [7]. Благодаря этому риск возникновения данных дефектов

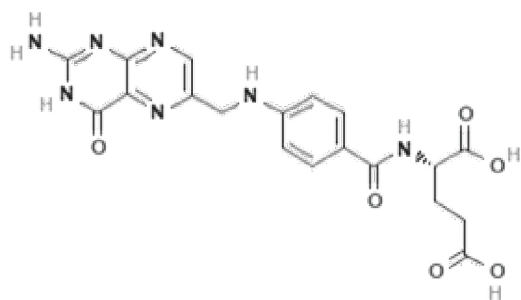
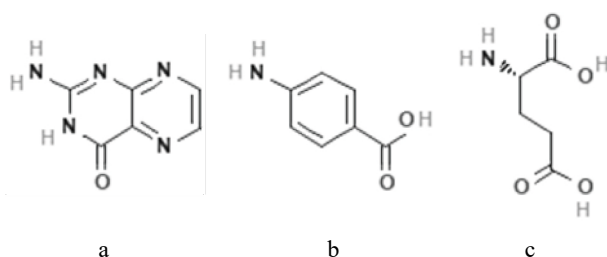


Рисунок 1. Химическая структура фолиевой кислоты

Figure 1. Folic acid: Chemical structure

Рисунок 2. Компоненты фолиевой кислоты:
a – птерин; b – p-аминобензойная кислота;
c – глутаминовая кислотаFigure 2. Folic acid components: a – pterin;
b – p-aminobenzoic acid; and c – glutamic acid

удалось снизить примерно на 40 % в странах с низким и средним доходом, при этом доказав безопасность и экономическую целесообразность подхода [8].

Фолиевая кислота представляет собой важное биологически активное соединение, играющее ключевую роль во многих биохимических процессах организма человека. В связи с этим научные исследования направлены на изучение условий, обеспечивающих ее стабильность. Установлено, что при стандартных условиях хранения (20 °C, относительная влажность 65 %) фолиевая кислота (в твердом состоянии) разлагается со скоростью 1 % в год¹. A. Vora *et al.* [13] исследовали нагревание кристаллической фолиевой кислоты до 800 °C и установили, что при температуре около 180 °C сначала отделилась глутаминовая кислота, а затем произошла деградация птерина и p-аминобензойной кислоты, протекавшая перекрывающимся образом (рис. 2) [13]. При нагревании до 195 °C зафиксирована полная потеря свойств амидных и кислотных функциональных групп, а при повышении температуры до 200 °C произошло интенсивное разрушение структуры, в результате которого кристаллическая форма фолиевой кислоты перешла

в аморфное состояние. Сходную картину деградации наблюдали исследователи [14] при изучении коммерческого лекарственного препарата, содержащего фолиевую кислоту.

При температуре до 180 °C фолиевая кислота в модельных пищевых системах достаточно стабильна. При нагревании до 100 °C в течение 2 ч сохраняется от 75 до 92 % фолиевой кислоты². При многократном нагревании первый нагрев усиливает разрушение фолиевой кислоты при последующей термической обработке³. По-видимому, наличие определенных продуктов распада приводит к более интенсивному разрушению исходного соединения, тогда как присутствие других компонентов, напротив, способствует стабильности фолиевой кислоты. В присутствии железа, аскорбата или их комбинации при высоких температурах (100, 120 и 140 °C) фолиевая кислота была относительно стабильна во всех системах по сравнению с состоянием при отсутствии этих добавок. Аналогичные результаты получены для фолиевой кислоты в сочетании с аскорбиновой кислотой [15].

Приведенные результаты показывают, что фолиевая кислота требует особых условий хранения и применения для сохранения активности, особенно при использовании в медицинских и пищевых целях. Научные исследования продемонстрировали высокую безопасность и экономическую целесообразность обогащения пищевых продуктов фолиевой кислотой⁴ [8, 16, 17]. Однако на стабильность фолиевой кислоты влияют различные факторы: pH среды, температура, свет и окислители. При этом механизмы термической деградации витамина при выпекании хлеба до конца не изучены, а существующие исследования стабильности и биодоступности фолиевой кислоты в процессе производства хлеба немногочисленны [7]. В литературе также недостаточно исследований стабильности фолиевой кислоты в технологических процессах, таких как выпечка хлеба [12, 18, 19]. Определенное влияние на свойства и характеристики фолиевой кислоты оказывают другие компоненты пищевых продуктов, что связано с химическими, биохимическими и физиологическими взаимодействиями между нутриентами [20, 21]. Например, глицин может влиять на кислотно-щелочной баланс среды. В предварительных исследованиях установлено, что глицин увеличивает растворимость фолие-

² Day BPF, Gregory JF. Thermal stability of folic acid and 5-methyltetrahydrofolic acid in liquid model food systems. *Journal of Food Science*. 1983;48:581–587. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1983.tb10795.x>

³ Burton H, Ford JE, Franklin JG, Porter JW. Effects of repeated heat treatments on the levels of some vitamins of the B-complex in milk. *Journal of Dairy Research*. 1967;34:193–197. <https://doi.org/10.1017/S0022029900012346>

⁴ Лобзанова М. Е., Иванова С. А. Современные тенденции обогащения хлебобулочных изделий: материалы XII Междунар. науч.-практ. конф. «Вопросы науки 2025: потенциал науки, достижения и перспективы развития». Анапа, 2025. С. 53–61. <https://elibrary.ru/WEMELP>

¹ Tripet FY, Kesselring UW. Stability of solid folic-acid in relation to temperature and humidity. *Pharmaceutica Acta Helveticae*. 1975; 50(10):318–322.

Таблица 1. Рецептурный состав исследованных образцов (для изготовления 1 единицы изделия)

Table 1. Formulation for laboratory bakery samples, 1 unit

Образцы	Сырье	Мука, г	Вода, г	Соль, г	Фолиевая кислота, мкг/100 г готового продукта	Сахар, г	Глицин, мг/100 г готового продукта
1–4		120	60	0,6	400	–	–
5		120	60	0,6	400	2,4	–
6		120	60	0,6	400	2,4	100
7		120	60	0,6	400	2,4	100
8		120	60	0,6	400	2,4	100

вой кислоты в водных растворах^{5,6} [22]. Поскольку фолиевая кислота чувствительна к высоким температурам, окислению и ультрафиолетовому излучению, изменение pH в продукте может потенциально повлиять на ее стабильность.

Цель исследования – определить влияние глицина на термическую стабильность свободной фолиевой кислоты в составе рецептуры обогащенного хлебобулочного изделия в процессе выпекания.

Объекты и методы исследования

В качестве объектов исследования выступали образцы (табл. 1), приготовленные из следующих компонентов: муки пшеничной хлебопекарной высшего сорта (ООО «КДВ Яшкинская Мельница», Россия) согласно ГОСТ 26574-2017; питьевой воды «Бердовская таежная» (ООО «Чистая вода», Россия) в соответствии с ГОСТ 32220-2013; поваренной соли (АО «SALINA», Россия) по ГОСТ Р 51574-2018; фолиевой кислоты (Qingdao Samin Chemical Co., Ltd., Китай) и сахара согласно ГОСТ 33222-2015 (ARO, Россия), а также глицина (Qingdao Samin Chemical Co., Ltd., Китай). Данные образцы имитировали хлебобулочные изделия в лабораторных условиях.

В емкость тестомесителя сначала загружали сухие ингредиенты (муку, фолиевую кислоту, сахар, а также глицин – при необходимости). Компоненты перемешивали, после чего добавляли воду. Затем замешивали до получения однородной эластичной массы (около 10 мин). После формовки изделий и предварительной расстойки образцы выпекали в пароконвектомате в течение 30–35 мин при температуре 180–185 °С и пароувлажнении 30 % (или при сбрызгивании стенки печи водой непосредственно перед посадкой). Готовые образцы, имитирующие хлебобулочные изделия, высушивали методом сублимационной сушки и хранили до проведения последующего химического анализа.

⁵ Лобзанова М. Е. Влияние фолиевой кислоты и глицина на сохранение свежести хлеба: материалы Междунар. науч.-прак. конф. «Теоретические и практические основы научного прогресса в современном обществе». Киров, 2026. С. 146–149.

⁶ Лобзанова М. Е. Влияние фолиевой кислоты и глицина на качество хлебобулочных изделий: материалы Междунар. науч.-прак. конф. «Материалы и методы инновационных научно-практических исследований и разработок». Екатеринбург, 2026. С. 57–60.

Содержание фолиевой кислоты в образцах после выдерживания в термостате определяли методом ВЭЖХ на хроматографе Shimadzu LC-20 Prominence (Shimadzu Corporation, Япония) с диодно-матричным детектором Shimadzu SPD-20MA (Shimadzu Corporation, Япония) и колонкой HyperClone 5 мкм BDS C-18 250×4,6 мм Phenomenex (Torrance, США). Подвижная фаза состояла из бидистиллированной воды (pH = 2,9) и ацетонитрила. Для установления pH = 2,9 использовали раствор серной кислоты 1:10. Значение pH водного раствора измеряли с помощью иономера. В хроматограф вводили раствор исследуемых образцов в количестве 20 мкл. Из заранее измельченной специально подготовленной навески отбирали пробу и помещали ее в перемешивающее устройство для экстракции в соответствии с методикой выполнения измерений МН 2146-2004 «Методика определения фолиевой кислоты в обогащенных продуктах питания» (Минск, Республика Беларусь). Полученные экстракты центрифугировали в лабораторной центрифуге (при 5000–5500 об/мин в течение 20 мин). Температура колонки составляла 25 °С, детектирование проводили при длине волны 286 нм и ширине оптической полосы 20 нм после градиентного элюирования экстракта на хроматографической колонке, скорость потока – 1 мл/мин.

Все числовые значения подвергали первичному статистическому анализу с использованием функционала Microsoft Office Excel 2007. Данные представлены как среднее значение ± стандартное отклонение. С помощью критерия Стьюдента оценивали однородность распределения эмпирических выборок. Для определения статистически значимых различий между средними значениями применяли однофакторный дисперсионный анализ (ANOVA). Уровень достоверности статистических различий между контрольной и экспериментальными группами растворов определяли с помощью критерия Тьюки. Статистически значимыми считали различия при $p < 0,05$.

Результаты и их обсуждение

Считается, что в процессе ферментации дрожжи вырабатывают нативные формы фолата, такие как тетрагидрофолат, 5-формилтетрагидрофолат, 5-метилтетрагидрофолат и 10-формилфолат. В работе [7] проанализирована концентрация фолиевой кислоты

в дрожжах и образцах французского хлеба без добавления фолиевой кислоты, при этом количество В₉ в исследованных образцах не установлено. Во время брожения содержание синтетической фолиевой кислоты оставалось практически неизменным, что подтверждает отсутствие значимого влияния дрожжей на содержание фолиевой кислоты в хлебе. Поэтому для изучения сохранности фолиевой кислоты в смеси с глицином в процессе выпекания хлеба на предварительном этапе было принято решение использовать лабораторные образцы, состоящие из муки, воды, сахара, фолиевой кислоты и глицина.

Традиционно уровень фолиевой кислоты в пищевых продуктах определяют с помощью метода ВЭЖХ, обладающего достаточной чувствительностью. Отмечается, что для анализа образцов хлеба требуется дополнительная подготовка и их очистка, что увеличивает время и стоимость исследования [23]. На рисунке 3 представлены хроматограммы образцов с добавлением фолиевой кислоты в сочетании с глицином.

На хроматограммах ВЭЖХ анализа (рис. 3б–е) наблюдались пики в том же временном интервале как и на стандарте фолиевой кислоты, что подтверждает присутствие фолиевой кислоты во всех исследуемых образцах. Однако интенсивность пиков несколько варьировалась между исследованными образцами, что может свидетельствовать о неодинаковом содержании фолиевой кислоты. Опытный образец 4 (рис. 3е) показывает наиболее выраженный пик, тогда как в образце 2 (рис. 3с) пик менее интенсивен. Базовая линия во всех хроматограммах оставалась относительно стабильной, что говорит о хорошем качестве разделения и минимальном уровне шумов. На хроматограммах образцов 1–4 регистрировали дополнительные пики, которые, скорее всего, связаны с присутствием других компонентов в рецептуре. Форма пиков была симметричной, что указывает на удовлетворительное разрешение компонентов.

Таким образом, хроматограмма образца 4 демонстрировала четкий пик фолиевой кислоты с хорошей интенсивностью, что свидетельствует о достаточном содержании витамина в этом образце. В образцах 1 и 3 также присутствуют пики фолиевой кислоты, но с меньшей интенсивностью, чем в образце 2, что указывает на меньшее содержание витамина. Хроматограмма образца 2 имела самый слабый пик среди всех образцов, что подтверждает минимальное содержание фолиевой кислоты в нем. При этом во всех образцах фолиевая кислота присутствует, но в разных концентрациях. Форма пиков достаточно симметрична, что является показателем хорошего разделения компонентов и отсутствия значительных примесей. Это обосновывается аналитическими значениями фолиевой кислоты (табл. 2). Учитывая эти значения и значение вносимой в смесь фолиевой кислоты, установлено, что в результате термической обработки образцов 1–4 разрушено от 83,2 до 86,8 % фолиевой кислоты.

В работе [24] проанализированы образцы французского хлеба на предмет содержания фолиевой кислоты для выявления влияния промышленной обработки на конечное количество этого витамина в продукте. Исследуемые образцы выпекали при разных температурах (160, 190 и 220 °С) в течение 9, 12, 15 и 20 мин с использованием пара или без него в первые 10 с выпекания. Хлеб высушивали методом сублимационной сушки и хранили для последующего химического анализа. Проведенные исследования показали, что условия выпечки существенно влияют на сохранность фолиевой кислоты в готовом хлебе. Наиболее благоприятным режимом оказалась температура 190 °С, при которой было достигнуто наибольшее сохранение витамина. При более низких температурах (160 °С) содержание фолиевой кислоты также оказывалось ниже, хотя потери не столь значительны. В то же время высокие температуры (220 °С) приводили к существенному разрушению витамина из-за термического разложения. Режимы в 9 и 20 мин негативно сказывались на сохранности фолиевой кислоты, тогда как наиболее благоприятным оказался промежуточный вариант – 12–15 мин. Использование пара позволило значительно увеличить содержание фолиевой кислоты в готовом продукте по сравнению с выпечкой без пара. Даже при оптимальных условиях происходило некоторое снижение содержания витамина, однако оно оставалось в допустимых пределах. Максимально эффективное сохранение фолиевой кислоты достигается при температуре выпечки 190 °С, наличии пара в процессе выпечки и продолжительности выпекания 12–15 мин. При соблюдении условий удалось минимизировать потери (не более 25 %) витамина и получить продукт с максимально сохраненной фолиевой кислотой (246,7 мг/100 г продукта). Коммерческие образцы хлеба содержали приблизительно в 2,5 раза меньше фолиевой кислоты в готовом продукте, что соответствует результатам данного исследования.

Ряд исследований [12, 25] касается стабильности фолиевой кислоты в водных растворах, что важно при стерилизации продуктов с ее содержанием. В этих работах рассматривался диапазон температур от 100 до 120 °С, в котором фолиевая кислота демонстрирует хорошую стабильность при различных временных интервалах и значениях pH, особенно в щелочных растворах по сравнению с кислыми. При автоклавировании (121 °С) водного раствора фолиевой кислоты в течение 30 мин произошло полное разложение при pH = 1; при pH = 3 разрушилось около 45 %; при pH от 4 до 12 – до 30 %⁷. В автоклаве фолиевая кислота при pH от 5 до 10 остается практически стабильной при температуре 121 °С в течение 15 мин, а при температуре 100 °С в течение 1 ч, при понижении pH ее стабильность снижалась, фолиевая кислота

⁷ Daniel EP, Kline OL. Factors affecting folic acid determination. Journal of Biological Chemistry. 1947;170:739–746. [https://doi.org/10.1016/s0021-9258\(17\)30856-6](https://doi.org/10.1016/s0021-9258(17)30856-6)

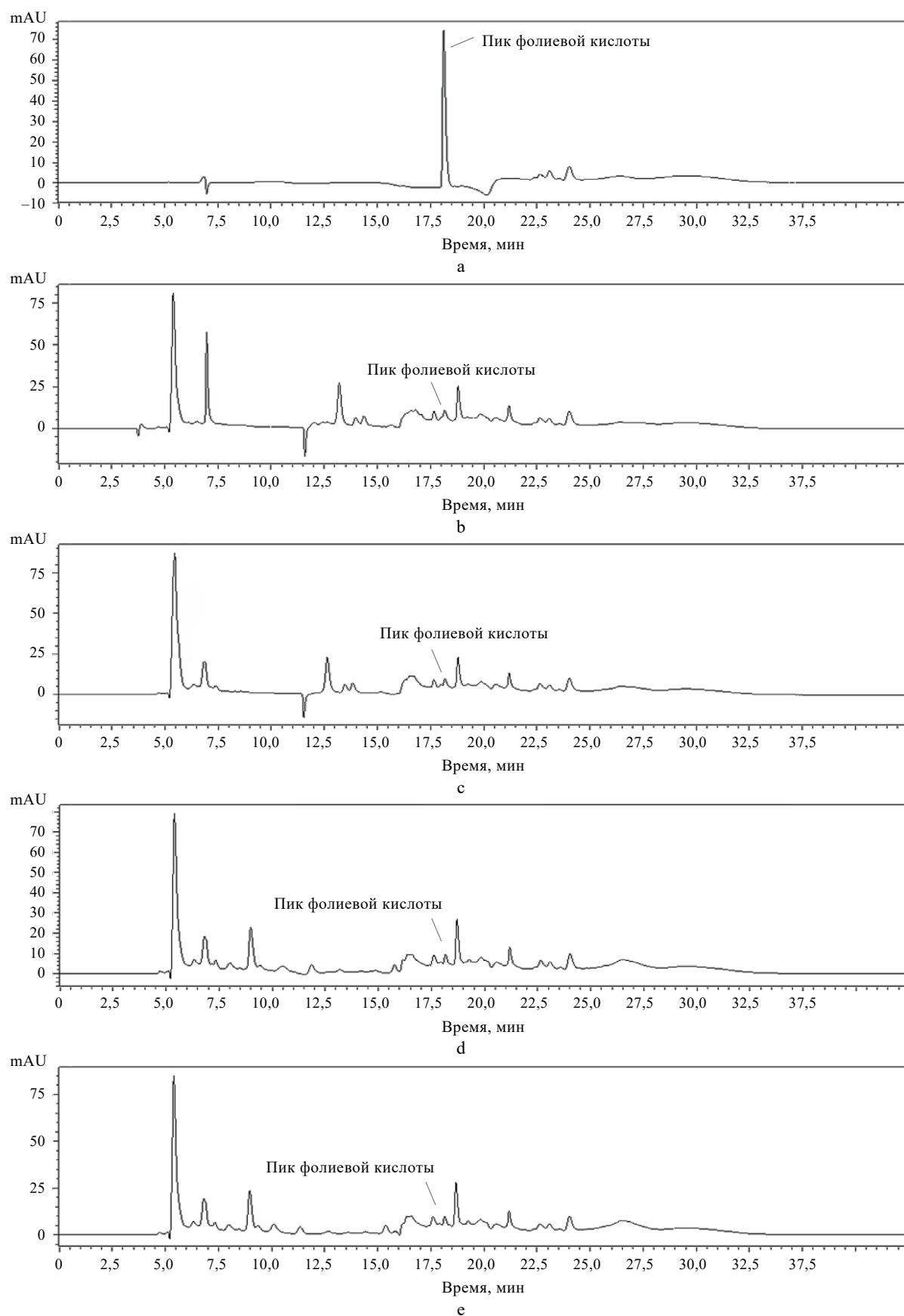


Рисунок 3. Хроматограмма ВЭЖХ анализа: а – стандарт фолиевой кислоты; б – образец 1; с – образец 2; д – образец 3; е – образец 4

Figure 3. HPLC analysis chromatogram: a – folic acid standard; b – sample 1; c – sample 2; d – sample 3; and e – sample 4

Таблица 2. Количество фолиевой кислоты в исследуемых образцах

Table 2. Folic acid in the samples

Образец	Фолиевая кислота, мкг/100 г продукта
1	66,27 ± 3,10
2	67,04 ± 11,87
3	52,80 ± 5,04*
4	65,75 ± 3,54

Примечание: начальное содержание фолиевой кислоты – 400 мкг/100 г продукта. Данные представлены как среднее значение ± стандартное отклонение (n = 3). * – значение значительно отличается $p < 0,05$.

Note: The initial folic acid content is 400 µg/100 g of the product. The data is presented as the mean ± standard deviation (n = 3). * – the value is significantly different from $p < 0.05$.

разлагалась до 50, 20 и 5–10 % при pH 1, 2 и 3–4 соответственно⁸. Аналогичные данные получены другими исследователями^{9,10,11} [12].

После инкубации фолиевой кислоты при 30 °C в течение одной недели наблюдалось ее разложение около 2; 4 и 26 % при pH 4,5; 7,3 и 9,2 соответственно¹². Стабильность фолиевой кислоты отмечена в диапазоне pH аминокислотной кислоты (растворы с комплексами витаминов группы B)¹³.

Период полураспада фолиевой кислоты составлял более 700 ч при pH от 5 и температуре окружающей среды; при pH ниже 4 этот показатель сокращался до 24–64 ч¹⁴. Проанализирован термолиз фолиевой кислоты в нейтральном растворе при микроволновом или обычном нагревании: при классическом нагревании до 100 °C фолиевая кислота проявляла стабильность, тогда как микроволновое воздействие не влияло¹⁵.

⁸ Dick MIB, Harrison IT, Farrer KTH. Thermal stability of folic (Pteroylglutamic) acid. Australian Journal of Experimental Biology and Medical Science. 1948;26:239–244. <https://doi.org/10.1038/icb.1948.25>

⁹ Paine-Wilson B, Chen TS. Thermal-destruction of folacin: Effect of pH and buffer ions. Journal of Food Science. 1979;44:717–722. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1979.tb08484.x>

¹⁰ Garrett ER. Prediction of stability in pharmaceutical preparations II. Vitamin stability in liquid multivitamin preparations. Journal of the American Pharmaceutical Association. 1956;45:171–178. <https://doi.org/10.1002/jps.3030450313>

¹¹ Mneni AP, Beveridge T. Thermal destruction of pteroylglutamic acid in buffer and model food systems. Journal of Food Science. 1982; 47:2038–2041. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1982.tb12940.x>

¹² Koft B, Sevag MG. The liberation of diazotizable amine from pteroylglutamic acid. Journal of the American Chemical Society. 1949;71(9): 3245–3245.

¹³ Biamonte AR, Schneller GH. A study of folic acid stability in solutions of the B-complex vitamins. Journal of the American Pharmaceutical Association (Scientific ed.). 1951;40:313–320. <https://doi.org/10.1002/jps.3030400704>

¹⁴ O'Broin JD, Temperley JJ, Brown JP, Scott JM. Nutritional stability of various naturally occurring monoglutamate derivatives of folic-acid. The American Journal of Clinical Nutrition. 1975;28:438–444. <https://doi.org/10.1093/ajcn/28.5.438>

¹⁵ Cooper RG, Chen TS, King MA. Thermal destruction of folacin in microwave and conventional heating. Journal of the American Dental Association. 1978;73:406–410.

Влияние pH на стабильность фолиевой кислоты при температуре 100 °C исследовано с использованием четырех различных буферных систем: буферный раствор HCl/KCl, универсальный буфер, цитратный буфер и цитратно-фосфатный буфер. Буферные системы позволяли получать растворы с уровнем pH от 1,1 до 12,0. Фолиевая кислота оставалась стабильной при pH от 5 до 12 не менее 10 ч. Ее период полураспада увеличивался до 22 ч при увеличении значения pH до 4, а при pH > 5 период полураспада составлял более 60 ч. Период полураспада фолиевой кислоты практически не менялся при pH = 3 независимо от состава буфера¹⁶. V. De Brouwer et al. установили, что фолиевая кислота оставалась относительно стабильной в диапазоне pH от 2 до 10 как при термической обработке (нагревание до 100 °C в течение 10 мин), так и без нее (инкубация при 37 °C в течение 2 ч) [26]. Наблюдаемый широкий диапазон потерь фолиевой кислоты может быть связан с другими факторами окружающей среды, такими как уровень pH раствора.

Глицин (аминоуксусная кислота) – простейшая органическая нейтральная, глюконеогенная и протеиногенная аминокислота, которая традиционно считается необязательной с точки зрения питательной ценности [27, 28]. Это единственная протеиногенная аминокислота, не имеющая оптических изомеров, т. к. в качестве боковой цепи у нее всего один атом водорода (рис. 4). Глицин относится к заменимым аминокислотам и может синтезироваться в организме человека, но скорость его синтеза ограничена. Расчеты показывают, что у человека средней массы (70 кг) дефицит глицина составляет около 10 г в день даже с учетом его регулярного поступления с пищей [28]. Таким образом, количество глицина не удовлетворяет потребности клеток, потребность в нем является общей и не зависит от каких-либо конкретных обстоятельств, а его дефицит может привести к нарушению функций организма. Поэтому глицин приобретает уникальное пищевое и клиническое значение. В настоящее время глицин классифицируется как условно незаменимая аминокислота, которая поступает в организм как с пищей, так и синтезируется эндогенно, преимущественно из L-серина [29, 30].

Глицин – амфотерное соединение, которое содержит две функциональные группы противоположного характера: аминогруппу (–NH₂) с основными свойствами и карбоксильную группу (–COOH) с кислотными свойствами [27, 28, 31]. Выступая как кислота

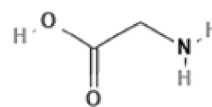


Рисунок 4. Химическая структура глицина

Figure 4. Glycine: Chemical structure

¹⁶ Paine-Wilson B, Chen TS. Thermal-destruction of folacin ...

(по карбоксильной группе), глицин образует соли, а по аминогруппе взаимодействует с кислотами. При взаимодействии с другими аминокислотами глицин образует пептиды. Глицин и фолиевая кислота взаимодействуют в водных растворах благодаря координационным и биохимическим механизмам, что может влиять на стабильность, растворимость и биодоступность фолиевой кислоты [22]. Фолиевая кислота также имеет функциональные группы, способные участвовать в координационных связях (карбоксильные и амидные) [32]. Эти взаимодействия обусловлены химическими свойствами обеих молекул и их способностью к формированию комплексов.

В водных растворах глицин образует координационные комплексы с ионами металлов, которые часто сопутствуют фолиевой кислоте или добавляются в качестве стабилизаторов. В таких комплексах карбоксильная группа фолиевой кислоты функционирует как моно- или бидентатный лиганд, связанный с одним ионом металла, или как мостиковый бидентатный лиганд, связанный с двумя ионами металла [32]. Глицин влияет на их структуру и стабильность, а формирование этих комплексов способно изменять растворимость, спектральные характеристики и устойчивость фолиевой кислоты в растворе.

Глицин хорошо растворим в воде, при добавлении в водный раствор фолиевой кислоты он увеличивает ее растворимость и улучшает коллоидные свойства [22]. Глицин также участвует в ионных взаимодействиях с фолиевой кислотой, которая в зависимости от pH раствора может существовать в ионизированной форме. Это влияет на распределение зарядов в растворе и, соответственно, на стабильность и агрегатное состояние фолиевой кислоты.

В данном исследовании распределение плохо растворимой фолиевой кислоты было неравномерным (табл. 1). Этого можно избежать, если сначала смешать порошок фолиевой кислоты с сахаром, затем добавить полученную смесь в муку, перемешать, а водный раствор глицина внести на последнем этапе [22]. Далее изучали влияние глицина на термоустойчивость фолиевой кислоты, за счет изменения ее структуры и химических свойств. На рисунке 5 представлены хроматограммы образцов с добавлением фолиевой кислоты в сочетании с глицином.

Результаты хроматографического анализа показали, что во всех исследованных образцах (рис. 5) фолиевая кислота присутствовала в одинаковой концентрации, о чем свидетельствовала сопоставимая высота пиков на хроматограммах. Образец 5 (без глицина) демонстрировал более чистую хроматограмму: один выраженный пик фолиевой кислоты и минимальный фоновый шум. В образцах 6–8, содержащих фолиевую кислоту и глицин, наблюдались два четко разделенных пика: основной пик (фолиевая кислота, 5–6 мин) и дополнительный (глицин, 10–12 мин). Отсутствие дополнительных пиков в образце 5 указывает на меньшую

сложность матрицы по сравнению с образцами 6–8. Глицин – низкомолекулярное вещество с максимумом поглощения 210–245 нм, элюируется до фолиевой кислоты^{17,18}, поэтому его добавление не мешало детекции и не влияло на форму и интенсивность пика фолиевой кислоты, однако слегка ухудшало качество хроматограммы за счет незначительного повышения фонового шума. Концентрации глицина в образцах 6–8 идентичны, о чем указывает одинаковая высота соответствующих пиков.

Хроматограммы (рис. 5) подтверждают присутствие фолиевой кислоты во всех образцах (5–8), но в разных концентрациях. Наименьшая концентрация обнаружена в образце 5. Все образцы содержали заявленные компоненты (глицин, фолиевую кислоту) в ожидаемых количествах. Содержание фолиевой кислоты в образцах с глицином оставалось стабильным после термической обработки. Время удерживания пика фолиевой кислоты в образцах 6–8 совпадало, что подтверждает идентичность и количество анализируемого вещества. Следовательно, содержание фолиевой кислоты в образцах 6–8 статистически ($p < 0,05$) идентично при добавлении в тесто одинакового количества глицина. Содержание фолиевой кислоты в образцах после термообработки приведено в таблице 3.

Потеря фолиевой кислоты после термообработки в образце 5 (без глицина) составила более 82 %, тогда как в образцах с глицином – менее 10 %, учитывая некоторую неравномерность распределения фолиевой кислоты в муке. Эту проблему можно решить, если растворять фолиевую кислоту с глицином в воде и вносить полученный раствор в смесь муки и других сухих компонентов.

В исследовании [7] в тесто добавляли 300 мкг фолиевой кислоты на 100 г муки (чистота 87 %). После гомогенизации в обогащенной муке сохранялось 261 мкг фолиевой кислоты на 100 г продукта. После выпечки хлеба (210 °С, с паром, 17 мин) содержание фолиевой кислоты снизилось до 183,8 мкг на 100 г сухого веса готового продукта, что составило 75,3 % от исходного количества. С учетом влажности готового хлеба фактическая концентрация фолиевой кислоты оказалась равной 113,3 мкг на 100 г готового хлеба (в естественном состоянии, т. е. с содержанием влаги).

Во время выпечки внутренняя температура хлеба достигала 97 °С через 16 мин, что соответствовало завершению процесса. Температура в печи сначала снижалась при загрузке теста (до 125 °С), затем постепенно повышалась до 182 °С через 17 мин и до 195 °С через 30 мин. Такой режим обеспечил сохранение 75,3 % фолиевой кислоты в готовом продукте относительно ее количества в обогащенной муке. Для компенсации потерь при выпечке и обеспечения необходимого

¹⁷ Глицин. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Глицин#cite_note-2d932e9125b1a185-5 (дата обращения 01.03.2026).

¹⁸ Glycine. URL: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/750> (дата обращения 01.03.2026).

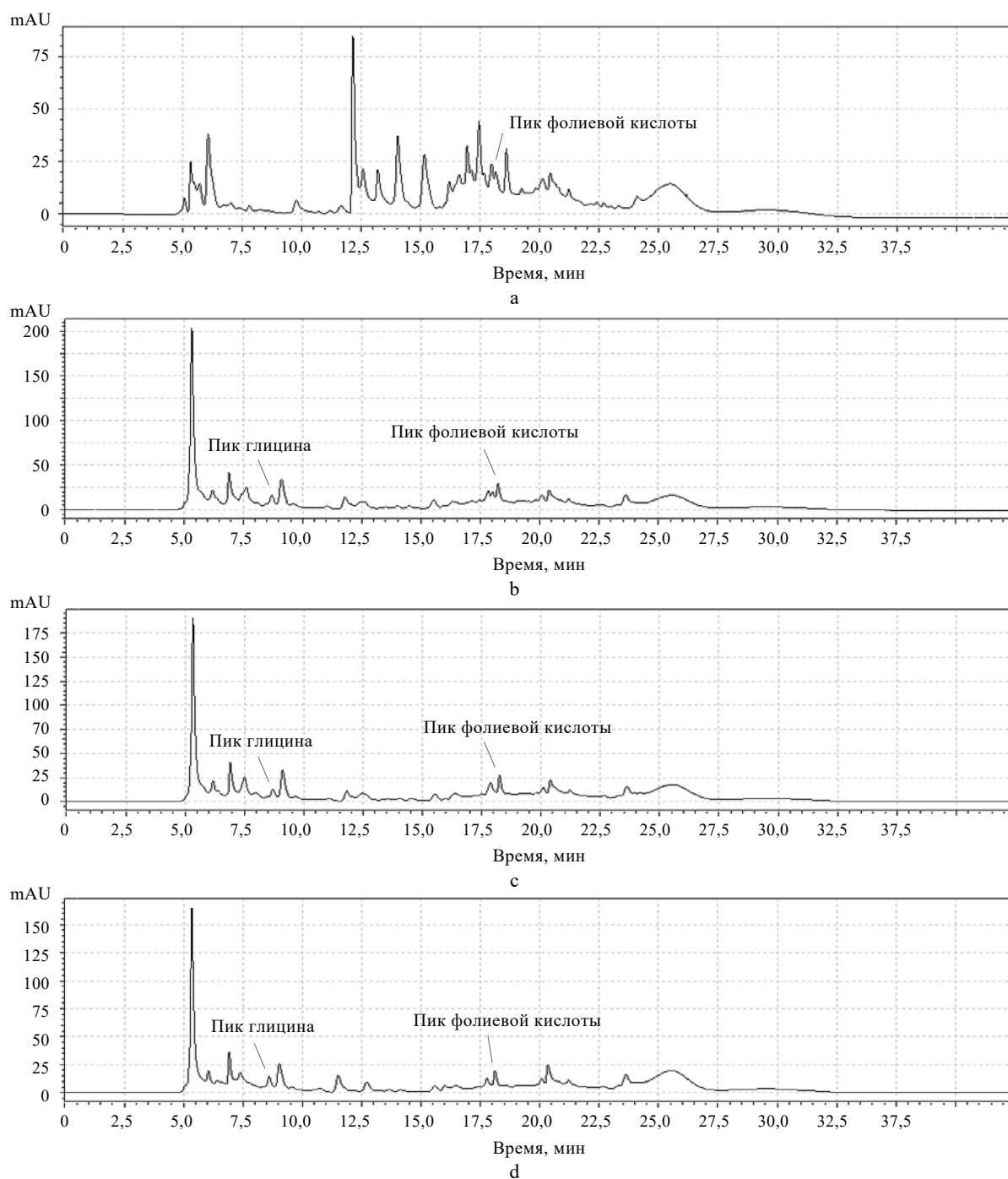


Рисунок 5. Хроматограмма ВЭЖХ анализа опытных образцов после термической обработки на содержание фолиевой кислоты: а – образец 5 (отрицательный контроль); б – образец 6; с – образец 7; d – образец 8
Figure 5. Post-thermal HPLC analysis for folic acid content: a – sample 5 (negative control); b – sample 6; c – sample 7; and d – sample 8

Таблица 3. Количество фолиевой кислоты в образцах с добавлением глицина в количестве 100 мг/100 г продукта
Table 3. Folic acid in samples with glycine (100 mg/100 g of product)

Образец	Фолиевая кислота, мкг/100 г продукта
5	69,41 ± 3,57
6	403,70 ± 15,36
7	375,29 ± 12,22
8	373,45 ± 13,17

Примечание: образец 5 – отрицательный контроль (без глицина). Данные представлены, как среднее значение ± стандартное отклонение (n = 3). Все значения значимо отличаются от отрицательного контроля ($p < 0,05$).

Note: Sample 5 is a negative control (without glycine). The data is presented as the mean value ± standard deviation (n = 3). All values significantly differ from the negative control ($p < 0.05$).

содержания фолиевой кислоты в готовом продукте авторы исследования [7] предлагают вносить в тесто не менее 300 мкг фолиевой кислоты на 100 г муки, тогда в готовом хлебе сохранится количество витамина, достаточное для обеспечения части суточной потребности при регулярном употреблении. Несмотря на наличие термического воздействия, фолиевая кислота оставалась стабильной и полностью доступной для усвоения в кишечнике после имитации процесса пищеварения [7].

А. Vora *et al.* описали трехэтапную деградацию фолиевой кислоты при нагревании [4]. На первом этапе, при температуре около 108 °С, происходила потеря адсорбированной воды, на втором (до 195 °С) – последовательное разрушение структуры: сначала отщеплялась глутаминовая кислота, затем происходило разложение птеринового кольца и п-аминобензойной кислоты (ПАБК, один из трех основных структурных компонентов молекулы фолиевой кислоты). Полное термическое разложение завершалось при температуре около 262 °С. Общая теплота разложения составила 960 ± 24 Дж/г. Процесс включал три эндотермических реакции: первая отвечала за 40 % процесса разрушения (потеря глутаминовой кислоты); вторая – за 8 %; третья (высокотемпературная) – за 52 % (разложение птеринового кольца и ПАБК).

Также исследование показало, что кристаллическая структура фолиевой кислоты при нагревании до 349 °С переходит в аморфное состояние. При 200 °С происходила значительная деградация с образованием углеродного остатка. Весь процесс термического разложения можно разделить на три стадии: потеря воды, отщепление глутаминовой кислоты и последующее разложение оставшихся компонентов до углеродного остатка.

Глицин оказывает эффект на все три стадии деградации фолиевой кислоты за счет физико-химических взаимодействий, влияющих на стабильность структуры и участия в побочных реакциях. Как амфотерная аминокислота, глицин может взаимодействовать с молекулой фолиевой кислоты через свои функциональные группы, что способно изменить характер ее термического разложения. На первом этапе (108 °С) глицин за счет образования дополнительных водородных связей способен корректировать скорость потери адсорбированной воды. На втором этапе аминокислота воздействует на отщепление глутаминовой кислоты и разложение птеринового кольца с ПАБК, образуя комплексы с компонентами молекулы фолиевой кислоты. На заключительной стадии (262 °С) глицин модифицирует общую теплоту разложения и соотношение вкладов отдельных эндотермических реакций. При этом сам глицин начинает разлагаться при 232–236 °С¹⁹ [53], что может дополнительно влиять на процесс термического разложения фолиевой кислоты. Кроме того,

глицин воздействует на кристаллическую структуру фолиевой кислоты, ускоряя переход вещества в аморфное состояние при нагревании выше 260 °С²⁰. Таким образом, добавление глицина потенциально способно как замедлить, так и ускорить отдельные стадии термического разложения фолиевой кислоты, изменяя общий характер ее деградации. Для точного определения характера и степени этого влияния требуются дополнительные экспериментальные исследования.

Выводы

Как известно, при термической обработке хлеба происходит частичная потеря фолиевой кислоты. По разным данным, приемлемым считается разрушение 20–30 % фолиевой кислоты от исходного количества. Итоговая сохранность витамина зависит от совокупности технологических факторов: от помола зерна до условий выпечки и хранения готового продукта.

В результате проведенного исследования установлено, что добавление глицина в тесто существенным образом влияет на сохранность фолиевой кислоты при термической обработке. В частности, при выпекании образцов, не содержащих глицин, потери фолиевой кислоты составили более 82 % от исходного содержания, тогда как в образцах с добавлением глицина – не превысили 10 %. Необходимо подчеркнуть, что использованное в эксперименте содержание глицина (100 мг/100 г продукта) обеспечило максимальную сохранность фолиевой кислоты среди всех исследованных концентраций.

Полученные результаты свидетельствуют о перспективности использования глицина в качестве стабилизатора при производстве обогащенных хлебобулочных изделий. Практическое значение работы заключается в том, что предложенный подход позволяет значительно повысить эффективность обогащения хлебобулочных изделий фолиевой кислотой, что, в свою очередь, может способствовать решению проблемы дефицита этого витамина в питании населения. Для точного определения характера и степени влияния глицина на свойства фолиевой кислоты, а также для выявления возможности управления этими свойствами требуются дополнительные экспериментальные исследования.

Критерии авторства

М. Е. Лобзанова – концептуализация, исследование, методология, подготовка первоначального черновика. В. П. Юстратов – методология, подготовка первоначального черновика. С. А. Иванова – формальный анализ, рецензирование и редактирование статьи, администрирование проекта.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

¹⁹ Глицин...

²⁰ Glycine...

Contribution

M.E. Lobzanova developed the research concept, designed the methodology, and wrote the initial draft. V.P. Yustratov developed the methodology and wrote the initial draft. S.A. Ivanova provided the formal analy-

sis, wrote the review, proofread the manuscript, and supervised the project.

Conflict of interest

The authors state that there is no conflict of interest.

Список литературы / References

1. Fallah M, Naeini F, Fahimzad FS, Nouri A, Manesh SMR, *et al.* Nutritional immunology in lifespan. *Experimental Gerontology*. 2026;214:113015. <https://doi.org/10.1016/j.exger.2025.113015>
2. Zhao Y, Liu X, Li R, Xiao H, Zhao T. Vitamin B₆ nutrition, metabolism, and the relationship of diseases: Current concepts and future research. *Journal of Future Foods*. 2026;6(5):765–779. <https://doi.org/10.1016/j.jfutfo.2024.12.007>
3. Harak SS, Shelke SP, Mali DR, Thakkar AA. Navigating nutrition through the decades: Tailoring dietary strategies to women's life stages. *Nutrition*. 2025;135:112736. <https://doi.org/10.1016/j.nut.2025.112736>
4. Vora A, Riga A, Dollimore D, Alexander KS. Thermal stability of folic acid. *Thermochimica Acta*. 2002;392–393: 209–220. [https://doi.org/10.1016/S0040-6031\(02\)00103-X](https://doi.org/10.1016/S0040-6031(02)00103-X)
5. Salishcheva OV, Prosekov AYU. Antimicrobial activity of mono- and polynuclear platinum and palladium complexes. *Foods and Raw Materials*. 2020;8(2):298–311. <http://doi.org/10.21603/2308-4057-2020-2-298-311>
6. Vesnina AD, Frolova AS, Chekushkina DYU, Milentyeva IS, Luzyanin SL, *et al.* Gut microbiota and its role in development of chronic disease and aging. *Foods and Raw Materials*. 2026;14(1):174–197. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2026-1-668>
7. Neves DA, Sousa Lobato de KB, Angelica RS, Filho JT, Oliveira de GPR, *et al.* Thermal and *in vitro* digestion stability of folic acid in bread. *Journal of Food Composition and Analysis*. 2019;84:103311. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2019.103311>
8. Parker J, Kisho A, Hou S, Goodman M, Cravens L, *et al.* Impact of mandatory grain fortification with folic acid on population folate concentrations and the risk of folate deficiency and insufficiency: A systematic review and meta-analysis. *Journal of Nutrition*. 2026;156(3):101291. <https://doi.org/10.1016/j.tjnut.2025.101291>
9. Gorodetsky R. Folic acid. *Encyclopedia of Toxicology*. 2024;4:751–754. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824315-2.00316-X>
10. Arzeni C, Pilosof AMR. Bioaccessibility of folic acid in egg white nanocarriers and protein digestion profile in solution and in emulsion. *Food Science and Technology*. 2019;111:470–477. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.05.070>
11. Sukhikh S, Babich O, Prosekov A, Patyukov N, Ivanova S. Future of chondroprotectors in the treatment of degenerative processes of connective tissue. *Pharmaceuticals*. 2020;13(9):220. <https://doi.org/10.3390/ph13090220>
12. Gazzali AM, Lobry M, Colombeau L, Acherar S, Azais H, *et al.* Stability of folic acid under several parameters. *European Journal of Pharmaceutical Sciences*. 2016;93:419–430. <https://doi.org/10.1016/j.ejps.2016.08.045>
13. Vora A, Riga A, Dollimore D, Alexander K. Thermal stability of folic acid in the solid-state. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2004;75:709–717. <https://elibrary.ru/EBNOSR>
14. Jankovi B. Thermal stability investigation and the kinetic study of Folsnak® degradation process under nonisothermal conditions. *An Official Journal of the American Association of Pharmaceutical Scientists*. 2009;11:103–112. <https://doi.org/10.1208/s12249-009-9363-6>
15. Indrawati C, Arroqui I, Messagie MT, Nguyen A, Van Loey M, *et al.* Comparative study on pressure and temperature stability of 5-methyltetrahydrofolic acid in model systems and in food products. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2004;52:485–492. <https://doi.org/10.1021/jf0349432>
16. Berry RJ. Lack of historical evidence to support folic acid exacerbation of the neuropathy caused by vitamin B₁₂ deficiency. *The American Journal of Clinical Nutrition*. 2019;110(3):554–561. <https://doi.org/10.1093/ajcn/nqz089>
17. Vollset SE, Clarke R, Lewington S, Ebbing M, Halsey J, *et al.* Effects of folic acid supplementation on overall and site-specific cancer incidence during the randomised trials: Meta-analyses of data on 50 000 individuals. *Lancet*. 2013; 381(9871):1029–1036. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(12\)62001-7](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(12)62001-7)
18. Delchier N, Herbig AL, Rychlik M, Renard CMGC. Folates in fruits and vegetables: Contents, processing, and stability. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 2016;15(3):506–528. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12193>
19. Phillips R, Pike OA, Eggett DL, Dunn ML. Folate stability in folic acid enriched corn masa flour, tortillas, and tortilla chips over the expected shelf life. *Cereal Chemistry*. 2017;94(6):917–921. <https://doi.org/10.1094/CHEM-02-17-0037-R>
20. Sun X, Wen J, Guan B, Li J, Luo J, *et al.* Folic acid and zinc improve hyperuricemia by altering the gut microbiota of rats with high-purine diet-induced hyperuricemia. *Frontiers in Microbiology*. 2022;13:907952. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.907952>

21. Pérez-Carreón K, Martínez LM, Videa M, Cruz-Angeles J, Gómez J, *et al.* Effect of basic amino acids on folic acid solubility. *Pharmaceutics*. 2023;15(11):2544. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics15112544>
22. Лобзанова М. Е., Сухих А. С., Альтшулер О. Г., Иванова С. А. Исследование влияния некоторых кислот на процесс растворимости фолиевой кислоты. *Техника и технология пищевых производств*. 2026. Т. 56. № 1 С. 154–163. [Lobzanova ME, Sukhikh AS, Altshuler OG, Ivanova SA. Effect of acidic media on folic acid solubilization patterns. *Food Processing: Techniques and Technology*. 2026;56(1):154–163. (In Russ.)] <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-1-2631>
23. Gujska E, Majewska K. Effect of baking process on added folic acid and endogenous folates stability in wheat and rye breads. *Plant Foods for Human Nutrition*. 2005;60(2):37–42. <https://doi.org/10.1007/s11130-005-5097-0>
24. Martins FCOL, Silva RG, Bredariol P, Vanin FM, Souza de D. Exploring an electroanalytical approach in the monitoring of bread quality: The folic acid analysis. *Journal of Food Engineering*. 2026;411:112917. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2025.112917>
25. Liang XS, Zhao FQ, Hao LX. Research on stability of synthetic folic acid. *Advanced Materials Research*. 2013; 781–784:1215–1218. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.781-784.1215>
26. De Brouwer V, Zhang G-F, Storozhenko S, Van Der Straeten D, Lambert E W, *et al.* pH stability of individual folates during critical sample preparation steps in prevision of the analysis of plant folates. *Phytochem Anal*. 2007;18:496–508. <https://doi.org/10.1002/pca.1006>
27. Holeček M. Glycine as a conditionally essential amino acid and its relationship to l-serine. *Metabolism*. 2025;170:156330. <https://doi.org/10.1016/j.metabol.2025.156330>
28. Meléndez-Hevia E, Paz-Lugo de P, Sánchez G. Glycine can prevent and fight virus invasiveness by reinforcing the extracellular matrix. *Journal of Functional Foods*. 2021;76:104318. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2020.104318>
29. Bassot A, Bulteau AL, Pirola L, Morio B. Glycine metabolism and its alterations in obesity and metabolic diseases. *Nutrients*. 2019;11:1356. <https://doi.org/10.3390/nu11061356>
30. Mino M, Kakazu E, Sano A, Tsuruoka M, Matsubara H, *et al.* Comprehensive analysis of peripheral blood free amino acids in MASLD: The impact of glycine-serine-threonine metabolism. *Amino Acids*. 2024;57(1):3. <https://doi.org/10.1007/s00726-024-03433-2>
31. Каширцева Е. Р., Сафронова А. В., Хохлов В. Ю., Хохлова О. Н. Взаимодействие глицина с гидрогелем на основе сополимера акриламида и акрилата калия. Сорбционные и хроматографические процессы. 2022. Т. 22. № 6. С. 821–830. [Kashirtseva ER, Safronova AV, Khokhlov VYu, Khokhlova ON. Interaction of glycine with a hydrogel based on a copolymer of acrylamide and potassium acrylate. Sorption and chromatographic processes. 2022;22(6):821–830. (In Russ.)] <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2022.22/10569>
32. Скорик Н. А., Вострецова Е. Н. Растворимость фолиевой кислоты и некоторых синтезированных фолатов металлов. Журнал неорганической химии. 2019. Т. 64. № 12. С. 1319–1325. [Skorik NA, Vostresctova EN. Solubility of folic acid and some synthesized metal folates. *Journal of Inorganic Chemistry*. 2019;64(12):1319–1325. (In Russ.)] <https://doi.org/10.1134/S0044457X19120171>

Дополнительная информация об авторах / Additional information about the authors

Лобзанова Марина Евгеньевна / Marina E. Lobzanova eLIBRARY SPIN 5924-7450

Юстратов Владимир Петрович / Vladimir P. Yustratov ORCID 0000-0002-1779-4332; eLIBRARY SPIN 3578-5617

Иванова Светлана Анатольевна / Svetlana A. Ivanova ORCID 0000-0002-1252-9572; eLIBRARY SPIN 1246-6109

<https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-2-2644>
<https://elibrary.ru/SSEKBE>

Обзорная статья
<https://fptt.ru>

К вопросу о пероральной доставке биологически активных белковых молекул: проблемы и перспективы



Н. В. Мерзлякова¹, С. А. Тихонов^{1,2,3,*},
Н. В. Тихонова², М. С. Тимофеева², А. Н. Семин⁴,
А. В. Курдюмов⁴, А. С. Лылов³

¹ Уральский государственный лесотехнический университет^{ROR}, Екатеринбург, Россия

² Уральский государственный аграрный университет^{ROR}, Екатеринбург, Россия

³ Башкирский государственный аграрный университет^{ROR}, Уфа, Россия

⁴ Уральский государственный экономический университет^{ROR}, Екатеринбург, Россия

Поступила в редакцию: 29.03.2026

Принята после рецензирования: 04.05.2026

Принята к публикации: 02.06.2026

*e-mail: tihonov75@bk.ru

© Н. В. Мерзлякова, С. А. Тихонов, Н. В. Тихонова,
М. С. Тимофеева, А. Н. Семин, А. В. Курдюмов,
А. С. Лылов, 2026



Аннотация.

К основным факторам, снижающим эффективность перорального применения биопептидов и белков относятся ферментативная деградация в ЖКТ, прохождение через слизистый слой, селективный барьер из эпителиальных клеток, кислая среда желудка и низкий период полувыведения. В связи с этим биологически активные белковые молекулы не могут эффективно использоваться в качестве функциональных пищевых ингредиентов в составе продуктов питания профилактического и лечебного назначения. Цель исследования – проанализировать научные направления и стратегии, способствующие решению проблемы нестабильности пептидов и белков в ЖКТ при пероральном применении.

Объектами исследования выступали научные публикации, посвященные пероральному применению, стабильности и биодоступности пептидов и белков в ЖКТ. Проведен систематический поиск в базах данных eLIBRARY.RU, MEDLINE, PubMed, EMBASE, Europe PMC, Scopus, Web of Science и Google Scholar за период 2020–2025 гг. (с включением фундаментальных более ранних работ). Из 1346 первоначально найденных результатов после ручного отбора в обзор включено 116 статей, касающихся повышения стабильности белков и пептидов в ЖКТ.

Установлено, что инкапсуляция пептидов в липидные (твердые липидные наночастицы, наноструктурированные липидные носители, липосомы) и полимерные наноносители повышает стабильность и биодоступность при пероральном применении. Клеточно-проникающие пептиды и их интеграция с различными носителями лекарственных средств позволяют создавать многофункциональные системы доставки. Перспективным направлением является использование модифицированных микроорганизмов (модифицированных живых биотерапевтических продуктов) для адресной доставки пептидов и белков. Разрабатываются методы амплификации матричных белков, а также стратегии создания пептидов для перорального введения с применением ингибиторов протеаз, усилителей проницаемости, химической модификации и циклизации.

В результате собственных исследований получен нативный противовирусный пептид. Его инкапсулирование в мальтодекстрин повысило стабильность в кишечнике на модели *in vitro* в 1,8 раза. Также синтезированы новые циклические биопептиды и рекомбинантный белок, доказано их биологическое действие в экспериментах *in vitro*.

Ключевые слова. Пептиды, белки, пероральная доставка, клеточно-проникающие пептиды, усовершенствованная микробная терапия, усилители проницаемости, полимерные системы, инкапсуляция, липидные носители

Для цитирования: Мерзлякова Н. В., Тихонов С. Л., Тихонова Н. В., Тимофеева М. С., Семин А. Н. и др. К вопросу о пероральной доставке биологически активных белковых молекул: проблемы и перспективы. Техника и технология пищевых производств. 2026. Т. 56. № 2. С. 380–400. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-2-2644>

Oral Delivery of Bioactive Protein Molecules: Problems and Perspectives



Natalia V. Merzlyakova¹, Sergey L. Tikhonov^{1,2,3,*},
Natalia V. Tikhonova², Maria S. Timofeeva², Alexander N. Semin⁴,
Alexander V. Kurdyumov⁴, Anton S. Lylov⁴

¹ Ural State Forestry University^{ROR}, Yekaterinburg, Russia

² Ural State Agrarian University^{ROR}, Yekaterinburg, Russia

³ Bashkir State Agrarian University^{ROR}, Ufa, Russia

⁴ Ural State University of Economics^{ROR}, Yekaterinburg, Russia

Received: 29.03.2026

Revised: 04.05.2026

Accepted: 02.06.2026

*e-mail: tikhonov75@bk.ru

© N.V. Merzlyakova, S.L. Tikhonov, N.V. Tikhonova, M.S. Timofeeva,
A.N. Semin, A.V. Kurdyumov, A.S. Lylov, 2026



Abstract.

Bioactive peptides and proteins can be administered orally. However, this method remains largely ineffective because of enzymatic degradation in the gastrointestinal tract, the mucus layer, the selective epithelial barrier, the acidic stomach environment, and a short half-life. As a result, bioactive protein molecules have little prospect as functional food ingredients unless appropriate delivery systems are used. This review describes scientific trends and strategies aimed at solving the problem of the instability of peptides and proteins in the gastrointestinal tract during oral administration.

The review analyzed scientific publications on the oral administration, stability, and bioavailability of peptides and proteins in the gastrointestinal tract registered in eLIBRARY.RU, MEDLINE, PubMed, EMBASE, Scopus, Web of Science, and Google Scholar between 2020 and 2025 (alongside some fundamental earlier works). Of the 1,346 manually selected publications, the review included 116 articles.

Peptides can be encapsulated in solid lipid nanoparticles, nanostructured lipid carriers, liposomes, or polymer nanocarriers. Encapsulation increases stability and bioavailability during oral administration. Cell-penetrating peptides and their integration with various drug carriers create multifunctional delivery systems. Modified living biotherapeutic products are promising carriers for the targeted delivery of peptides and proteins. Novel methods include matrix protein amplification, protease inhibitors, permeability enhancers, chemical modification, and cyclization.

The article also describes new cyclic biopeptides, a recombinant protein, and a native antiviral peptide with reliable bioactive properties. The maltodextrin-encapsulated antiviral peptide demonstrated a 1.8-fold increase in intestinal stability *in vitro*.

Keywords. Peptides, proteins, oral delivery, cell-penetrating peptides, advanced microbial therapy, permeability enhancers, polymer systems, encapsulation, lipid carriers

For citation: Merzlyakova NV, Tikhonov SL, Tikhonova NV, Timofeeva MS, Semin AN, *et al.* Oral Delivery of Bioactive Protein Molecules: Problems and Perspectives. Food Processing: Techniques and Technology. 2026;56(2):380–400. (In Russ.) <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-2-2644>

Введение

По прогнозам, объем рынка препаратов на основе белков (в т. ч. рекомбинантных) и пептидов к 2032 г. составит 1326,16 млрд долл США. Такие препараты вводятся преимущественно внутривенно, внутривенно, внутримышечно и подкожно. Перечисленные способы введения недостаточно удобны, создают риск инфицирования и являются дорогостоящими, что часто вызывает негативную реакцию пациентов, особенно страдающих хроническими заболеваниями (например диабетом), требующими регулярного лечения [1, 2]. В настоящее время лишь несколько

препаратов на основе белков разрешены и эффективны при пероральном приеме. Кроме того, сами действующие вещества – белки и пептиды – не могут использоваться в качестве функциональных пищевых ингредиентов в составе продуктов профилактического и лечебного назначения. Проблема заключается в том, что желудочно-кишечный тракт (ЖКТ) представляет собой естественный физиологический барьер на пути действующего белка или пептида в кровоток. Биодоступность белков при пероральном применении может снижаться до 2 % из-за воздействия на них желудочного сока и протеаз [3]. Проводятся испытания

инкапсулированных препаратов на основе белков, защищенных от кислотной денатурации и ферментативного разрушения, однако их применение в пероральной доставке по-прежнему ограничено рядом факторов. Во-первых, вязкий полупроницаемый слизистый слой служит первичным барьером для диффузии наночастиц к поверхности кишечного эпителия. Во-вторых, плотные контакты между эпителиальными клетками кишечника значительно препятствуют проникновению макромолекул через межклеточные щели. В-третьих, большой размер и гидрофильность макромолекул также препятствуют их трансклеточному прохождению [4].

Известно, что такие биомолекулы, как витамин В₁₂ и трансферрин, проникают через слизистый слой и эпителиальные клетки кишечника с помощью различных переносчиков и рецептор-опосредованных транспортных систем [5]. Однако и эти системы сталкиваются с множеством проблем, включая низкую экспрессию рецепторов-мишеней и недостаточную эффективность поглощения [6].

В научных исследованиях и в одобренных методах лечения внутривенное и подкожное введение остаются основными способами доставки терапевтических пептидов и белков. В то же время пероральное введение биопептидов и белков представляет большой интерес, поэтому проводятся научные исследования, направленные на создание пероральных пептидов и их использование в составе пищевых продуктов и лекарственных препаратов.

Цель исследования – проанализировать научные направления и стратегии, способствующие решению проблемы нестабильности пептидов и белков в ЖКТ при пероральном применении.

Объекты и методы

Методология обзорного исследования включала поиск литературы с применением критериев включения и исключения, определение источников данных, отбор субъектов исследования, а также сопоставление, обобщение и представление результатов. Использован поисковый запрос по ключевым словам: пероральное применение, пептиды, белки, стабильность пептидов в желудочно-кишечном тракте (ЖКТ), биодоступность пептидов и др.

Чтобы сосредоточиться на наиболее актуальных исследованиях, поиск в базе данных был ограничен периодом с 2020 по 2025 гг., но также использованы некоторые информативные фундаментальные статьи, опубликованные более десяти лет назад. Также в обзоре проанализированы статьи за последние 3 года, на которые ссылались авторы. В анализ включены экспериментальные и обзорные статьи по теме, находящиеся в открытом доступе, а также аннотации статей с закрытым полнотекстовым доступом.

В качестве источника информации использовали базы данных eLIBRARY.RU, MEDLINE, PubMed,

EMBASE, Europe PMC (препринты), Scopus, Web of Science и Google Scholar.

Поиск в базах данных позволил получить 1346 результатов, вручную отобрано 248 статей. В обзор включено 116 статей, посвященных проблематике повышения стабильности белков и пептидов в ЖКТ.

Результаты и обсуждение

Основные проблемы при пероральном введении пептидов и белков. Пероральная доставка крупных и структурно сложных биомолекул затруднена из-за их низкой стабильности в кишечнике и ограниченной абсорбции [7, 8], а большая молекулярная масса и подверженность ферментативной деградации в условиях желудочно-кишечного тракта (ЖКТ) ограничивают их биодоступность при пероральном приеме и терапевтическую эффективность [9] (рис. 1). Таким образом, создание биопептидов и белков для применения внутрь представляет собой одну из важных комплексных задач, стоящих перед фармацевтической и биотехнологической промышленностью и направленных на повышение эффективности продуктов питания специализированного назначения и превентивной медицины [7, 10].

Проблемы со стабильностью возникают из-за различий в уровне pH и ферментативной деградации в разных отделах ЖКТ, в т. ч. из-за наличия пепсина в желудке (pH 1–4), трипсина и химотрипсина в тонком кишечнике (pH 6,5–7,0), а также жизнедеятельности микроорганизмов в толстом кишечнике (pH 5–7). Нарушения проницаемости связаны с преодолением слизистого слоя и селективного барьера из эпителиальных клеток, где белки плотных контактов (например окклюдин, клаудин) препятствуют парацеллюлярному транспорту и регулируют его.

Кислая среда желудка денатурирует большинство пептидов и белков, вызывая их разрушение до того, как они будут абсорбированы в кровоток [12]. Уровень pH в ЖКТ сильно варьируется в зависимости от рациона, состояния здоровья, возраста и пола. У здоровых людей pH в желудке низкий (1,0–2,5), в двенадцатиперстной кишке он повышается до нейтральных значений (6,0–6,5), а в дистальном отделе подвздошной кишки достигает 7,0–7,5, тогда как pH в толстой кишке колеблется в пределах 5,0–7,0 [13]. pH желудка может влиять на степень ионизации препаратов на основе пептидов, потенциально приводя к изменению их структуры или биологической активности [14].

Пищеварительные ферменты, которые в основном вырабатываются в желудке и тонком кишечнике, необходимы для расщепления пищевых белков на усваиваемые компоненты (короткие пептиды и аминокислоты). Однако эта ферментативная активность ограничивает пероральную доставку пептидных препаратов. В желудке пепсин является ключевым протеолитическим ферментом, оптимально действующим при кислом pH и эффективно расщепляющим белки. Так, период

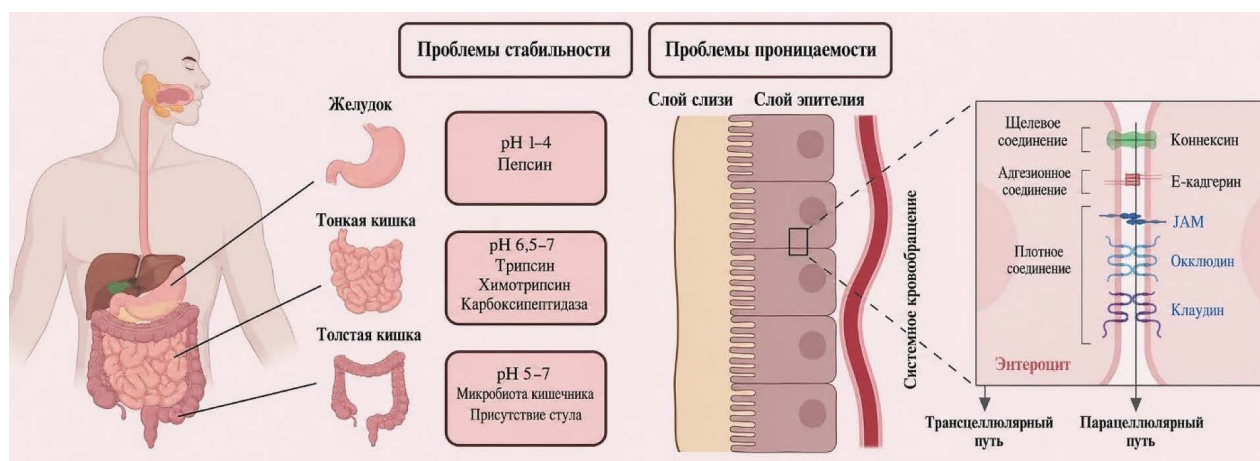


Рисунок 1. Основные проблемы при пероральном введении пептидов и белков [11]

Figure 1. Main challenges in oral administration of peptides and proteins [11]

полувыведения нативного ГПП-1 составляет менее 2 мин при pH 2,6 и примерно 5,5 мин при pH 5,0 под воздействием пепсина. Аналогичным образом семаглутид (в сочетании с SNAC) показал период полувыведения 16 мин при pH 2,6 и 34 мин при pH 5,0 [15]. В тонком кишечнике важную роль в расщеплении белков играют дополнительные ферменты, в т. ч. трипсин, химотрипсин и карбоксипептидаза. Трипсин расщепляет пептидные связи преимущественно после основных аминокислот – лизина и аргинина. Химотрипсин воздействует на ароматические и крупные гидрофобные аминокислоты (фенилаланин, тирозин и триптофан), а также, хотя и менее эффективно, на лейцин и метионин. Слизистый барьер существенно влияет на пероральную доставку пептидных препаратов, выполняя защитную функцию в ЖКТ. Он состоит в основном из воды и муцинов и образует сложную сеть из двух слоев: плотного внутреннего слоя, прилегающего к эпителию и защищающего от патогенов, и внешнего слоя, рыхло связанного с эпителием и колонизированного комменсальными микроорганизмами [16]. Коэффициент диффузии пептидов и белков в кишечной слизи снижается с увеличением молекулярной массы, причем основным препятствием для транспорта макромолекул становятся стерические затруднения. Помимо этого, на диффузию пептидов влияет распределение зарядов, т. к. сильно анионный синтетический пептид (заряд –12) легче диффундировал в восстановленных желудочных муциновых гелях, чем катионный пептид (заряд +8). Пептиды с почти нулевым зарядом (+2) не подвергались ограничениям, в некоторых случаях их диффузия усиливалась в присутствии муцинов. Кроме того, исследование на крысах *in vivo* показало, что слизь двенадцатиперстной кишки ограничивает диффузию макромолекул массой от 3,5 до 89,0 кДа, что указывает на ее роль в ограничении биодоступности пептидов [17].

Эпителий ЖКТ представляет собой значительный барьер для эффективного всасывания терапевтических препаратов на основе пептидов и белков, однако они могут проникать через эпителиальный слой трансклеточным или парацеллюлярным путем. Трансклеточный путь предполагает либо пассивную диффузию через апикальную и базолатеральную мембраны, либо использование механизмов активного транспорта (например слияние мембран и внутриклеточное всасывание с последующей системной секрецией) [18]. Несмотря на это, из-за большого размера пептиды и белки редко проникают через клеточные мембраны трансклеточным путем [19]. Их поглощение этим путем может ограничиваться внутриклеточной деградацией под действием цитозольных ферментов [20]. Парацеллюлярный путь предполагает транспорт лекарственного вещества через заполненные водой поры или парацеллюлярные пространства между соседними клетками. Площадь поверхности кишечного эпителия составляет примерно $2 \times 10^6 \text{ см}^2$, из которых лишь 0,01–0,10 % ($\sim 200\text{--}2000 \text{ см}^2$) приходится на межклеточное пространство. Теоретически этого достаточно для системной абсорбции пептидов и белков в пикомолярных и наномолярных концентрациях, способных оказывать биологическое воздействие [21]. Тем не менее плотные контакты в межклеточном пространстве ограничивают поглощение макромолекул. Эти межклеточные структуры, регулируемые такими белками, как клаудины, молекулы межклеточной адгезии и замыкательные пластинки действуют как структурные барьеры, препятствующие прохождению макромолекул [22]. Таким образом, биодоступность белковых молекул резко снижается, если их молекулярная масса превышает 700 Да [23]. Для преодоления указанных ограничений пептидов и белков исследователи-биотехнологи стремятся разработать соответствующие системы доставки [24].

Инкапсуляция и липидные носители. Инкапсуляция предполагает помещение пептидов в наноструктурированные матрицы или покрытия, обычно состоящие из липидов, полимеров или неорганических материалов, что обеспечивает улучшенную транспортировку и контролируемое высвобождение. Выбор материала зависит от физико-химических свойств пептида и предполагаемого терапевтического применения [25].

Твердотельные липидные наночастицы все чаще используются в качестве перспективных наноносителей для доставки лекарств при лечении различных заболеваний, включая микробные инфекции, диабет, неврологические расстройства, кожные заболевания и особенно рак [25]. Эти наночастицы состоят из кристаллического липидного ядра, стабилизированного поверхностно-активными веществами, а в некоторых случаях – со-поверхностно-активными веществами [26]. Состав твердой сердцевины наночастиц, которая обычно состоит из жирных кислот, жирных спиртов, восков, а также моно-, ди- и триглицеридов, может влиять на их свойства. Наночастицы являются твердыми при физиологической температуре, биосовместимыми и биоразлагаемыми, а также способны инкапсулировать как гидрофильные, так и липофильные лекарственные вещества, что повышает их стабильность, растворимость и биодоступность [27].

В отличие от этого, применение наночастиц серебра в качестве наноносителей для доставки лекарств сопряжено с рядом трудностей. К физико-химическим нестабильностям относятся перекристаллизация, полиморфные переходы, утечка лекарства при хранении и недостаточная степень загрузки лекарства, что ограничивает срок годности и клинический потенциал этих материалов. Однако недавние исследования продемонстрировали значительный прогресс в преодолении этих ограничений [28].

L. Su *et al.* [29] рассматривали возможность использования супрамолекулярных наночастиц в качестве носителей для сохранения структурной целостности пептидов в неблагоприятных условиях ЖКТ. В ходе исследования инкапсулированы две фракции пептидов, полученные из овсяного глобулина, в результате чего сформированы наночастицы с различными характеристиками: пептиды с молекулярной массой менее 3 кДа; пептиды от 3 до 10 кДа, которые имели средний размер 270,9 нм и индекс полидисперсности 0,44. Оба состава демонстрировали коллоидную стабильность. В имитационных средах ЖКТ наночастицы обеспечивали контролируемое высвобождение пептидов, которое было более медленным для частиц с низкомолекулярными пептидами. Максимальное высвобождение низкомолекулярных пептидов в желудочном соке составило 7,87 %; в кишечном соке – 42,0 % через 6 ч. Наночастицы сохраняли высокую ингибирующую активность в отношении дипептидилпептидазы IV (ДПП4), поддерживая функциональность пептидов и предотвращая их разруше-

ние. Неинкапсулированная фракция пептидов быстро теряла ингибирующую активность в отношении ДПП4, снижаясь с 70,0 до 30,8 и 8,4 % через 0, 2 и 3 ч инкубации соответственно. Эти результаты демонстрируют эффективность супрамолекулярных наночастиц как системы для защиты и доставки биоактивных пептидов при пероральном применении.

Наноструктурированные липидные носители (НЛН) – второе поколение липидных наночастиц, разработанное для преодоления ограничений первого поколения (а именно – супрамолекулярных липидных наночастиц [30]), таких как ограниченная способность к загрузке лекарственного вещества и риск его высвобождения при хранении вследствие кристаллизации твердой липидной матрицы. В составе НЛН используются биосовместимые и биоразлагаемые липиды в твердой и жидкой фазах. К твердым липидам относятся олеиновая кислота, каприловые триглицериды и α -токоферол, тогда как жидкие липиды включают коприт 888 АТО, прецириол АТО 5 и стеариновую кислоту [31]. Инкорпорация жидких липидов вызывает структурные дефекты в твердых липидах, приводя к менее упорядоченному расположению кристаллов, что предотвращает утечку лекарственного средства и обеспечивает высокую нагрузочную способность [32].

В последние годы наночастицы на основе липидов привлекают внимание в качестве альтернативы супрамолекулярным наночастицам, полимерным наночастицам, эмульсиям, микрочастицам, липосомам и другим носителям [33]. Эти наноносители подходят для доставки как гидрофильных, так и липофильных лекарственных препаратов и могут применяться перорально, парентерально, а также в офтальмологии, пульмонологии, при местном и трансдермальном использовании [34]. Среди их преимуществ – более высокая нагрузочная способность по сравнению с супрамолекулярными наночастицами и устойчивость к агрегации частиц при хранении. Однако они обладают цитотоксическим действием, а используемые поверхностно-активные вещества могут вызывать раздражение и сенсибилизацию [35].

Колистин – пептид, взаимодействующий с липополисахаридами на внешней мембране грамотрицательных бактерий, вызывая прежде всего вытеснение ионов кальция и магния. Этот механизм значительно снижает стабильность внешней мембраны и повышает ее проницаемость, что приводит к гибели бактерий вследствие выхода цитоплазматического содержимого [36]. L. Fernández-Barat *et al.* [37] инкапсулировали колистин, чтобы оценить его эффективность против бактерии *Pseudomonas aeruginosa*. Средний размер наночастиц составлял 300–427 нм, эффективность инкапсуляции – 80–95 %, что обеспечивало пролонгированное высвобождение препарата – не менее 50 % в течение первых 24 ч. Антимикробная активность в отношении планктонных бактерий показала, что как свободный, так и наноинкапсулированный колистин

имеют минимальную ингибирующую концентрацию ≤ 4 мкг/мл для большинства изолятов. Однако для уничтожения биопленок свободный колистин требовался в концентрации от 640 до 2560 мкг/мл, тогда как колистин, инкапсулированный в наночастицы, успешно уничтожал биопленки при концентрации всего 160–320 мкг/мл. Кроме того, в тестах на рост бактерий восьмикратная минимальная ингибирующая концентрация свободного колистина (16 мкг/мл для штамма 056SJD и 256 мкг/мл для штамма P19) сразу же подавляла рост бактерий, но наночастицы еще больше повышали эффективность против резистентных штаммов. Полученные результаты показывают, что инкапсуляция колистина в липидные наночастицы усиливает его антимикробную и противобиопленочную активность, что делает этот подход перспективной стратегией борьбы с резистентными инфекциями.

Авторы [38] продемонстрировали преимущества использования наноносителей, в частности липидных наночастиц, для доставки таких пептидов, как гесперидин и кларитромицин, при лечении *Helicobacter pylori*. Оптимизированные липидные наночастицы имели средний размер частиц (19,6 нм) и отрицательный дзета-потенциал (19,4 мВ), что обеспечивало высокую стабильность системы. Такой нанометровый размер повышает биодоступность, облегчая проникновение в бактериальную мембрану и защищая инкапсулированные препараты от воздействия кислой среды желудка. Наночастицы обеспечивали контролируемое и пролонгированное высвобождение лекарственного вещества в течение 24 ч с эффективностью инкапсуляции 78 % для гесперидина и 28 % для кларитромицина, что позволило сократить частоту введения препарата и повысить его антимикробную эффективность. Исследования *in vitro* показали, что рост *H. pylori* подавляется в зависимости от времени и концентрации, достигая 94 % подавления. Совместное действие компонентов приводит к повреждению бактериальной мембраны, повышает проницаемость для антибиотика и способствует уничтожению бактерий. Эти результаты позволяют предположить, что инкапсуляция антимикробных препаратов в наночастицы снижает необходимую дозировку, уменьшает частоту введения и повышает противомикробную активность в отношении основного возбудителя гастрита.

Липосомы. Липосомы – автономные сферические наноносители на основе липидного бислоя, широко используемые в медицине для доставки лекарств [39]. Они состоят из фосфолипидов холестерина, что делает их биоразлагаемыми, биосовместимыми, а также малотоксичными и иммуногенными [40]. Выбор подходящего липидного состава для доставки пептидов имеет решающее значение, поскольку он влияет на физические свойства липосом, в т. ч. на эффективность инкапсуляции, содержание и стабильность пептида [41]. Фосфатидилэтаноламины менее склонны к образованию ламеллярных фаз, поэтому их часто используют

для создания фузогенных липосом, которые могут сливаться с мембранами клеток-мишеней. Кроме того, в липосомальных носителях антимикробных пептидов обычно не используют анионные фосфолипиды (например фосфатидилглицерин), т. к. многие катионные антимикробные пептиды проявляют мембраноразрушающую активность в присутствии анионных фосфолипидов [42].

S. Cantor *et al.* [43] выявили достоинства использования наноносителей для доставки пептидов, особенно с точки зрения антимикробной активности. Инкапсуляция пептидов в липосомы, покрытые полимером (Eudragit E-100), значительно повысила их стабильность и биологическую активность. Размер частиц наноносителей составлял примерно 235 нм в липосомах без покрытия и увеличивался почти вдвое при добавлении пептидов. Дзета-потенциал после нанесения покрытия менялся с отрицательного на положительный, что свидетельствует об эффективной модификации поверхности (с -18 до $+11$ мВ). Антимикробная эффективность инкапсулированных пептидов значительно повысилась. Инкапсуляция увеличила активность пептида против *Listeria monocytogenes* в 2083 раза, а в присутствии *Escherichia coli* – в 12,5 раза. Эти результаты демонстрируют потенциал подобных наноносителей в борьбе с пищевыми патогенами.

N. M. Alzahrami *et al.* [44] инкапсулировали тобрамицин и пептид IDR-1018 в липосомы для оценки их эффективности в отношении референс-штамма *P. aeruginosa* PA01. Эффективность инкапсуляции тобрамицина составила 94 ± 2 %, размер частиц не превышал 200 нм, а дзета-потенциал был выше 55 мВ, что указывает на коллоидную стабильность и сильное электростатическое взаимодействие с бактериальной биопленкой. Анализ минимальной ингибирующей концентрации показал, что пептид IDR-1018 эффективен против PA01.

Полимерные наноносители. Полимерные наноносители, состоящие из синтетических, полусинтетических или природных полимеров, были тщательно изучены благодаря их способности повышать терапевтическую эффективность и снижать токсичность действующих веществ [45]. Эти носители обеспечивают пролонгированное высвобождение лекарственных средств с уникальной фармакокинетикой для доставки антимикробных пептидов, белков и ДНК в определенные органы или клетки [46].

Скорость высвобождения лекарственного средства зависит от характеристик полимера, условий приготовления и свойств. Основные механизмы высвобождения включают диффузию, эрозию матрицы и осмотическое давление [47]. Способ приготовления определяет характер взаимодействия терапевтического соединения с полимерной матрицей: растворение, связывание, инкапсуляция или удержание внутри матрицы. Полимерные наночастицы могут представлять собой нанокапсулы или наносферы. Нанокапсулы содержат

терапевтические соединения, заключенные в полимерную оболочку, тогда как наносферы – соединения, встроенные в полимерную матрицу [48].

B. Giordani *et al.* [49] инкапсулировали антимикробные пептиды G17 и G19 в наночастицы полимолочной гликолевой кислоты для повышения их стабильности и антимикробной активности в отношении *E. Coli* O157:H7. Полученные наночастицы имели средний размер (290 нм).

Полимерные покрытия служат защитным барьером от воздействия соляной кислоты и обеспечивают контролируемое высвобождение активных соединений в кишечнике в зависимости от локализации [50]. К числу таких полимеров относятся сукцинат ацетата гидроксипропилметилцеллюлозы и фталат гидроксипропилметилцеллюлозы, которые интенсивно изучаются за счет своих энтеросолюбивых и пластифицирующих свойств, облегчающих инкапсуляцию антимикробных пептидов и pH-чувствительных биоактивных веществ [51]. Сукцинат ацетата гидроксипропилметилцеллюлозы растворяется при pH выше 5,5, что позволяет использовать его для защиты соединений в желудке и обеспечения их высвобождения в тонком кишечнике. В отличие от него, фталат гидроксипропилметилцеллюлозы растворяется при более высоких значениях pH (обычно выше 6,0), что обеспечивает высвобождение на поздних этапах. Такой подход эффективно предотвращает преждевременную деградацию активных метаболитов и повышает их биодоступность, структурную стабильность, биоактивность и функциональные характеристики при прохождении через ЖКТ [52].

В результате собственного исследования из трипсинового гидролизата коровьего молозива получен пептид, состоящий из 20 аминокислотных остатков. В эксперименте *in vitro* подтверждена его противовирусная и антиоксидантная активность. Пептид инкапсулировали в псевдокипящем слое при нанесении защитного слоя мальтодекстрина. Установлено, что через 2 мин обработки при скорости витания частиц пептида $0,35 \times 10^{-3}$ формируется защитный поверхностный слой толщиной 12 мкм; через 3 мин – 14 мкм; через 5 мин – 16 мкм. Таким образом, после 2 мин скорость образования слоя снизилась до 2 мкм/мин. За последующие 9 мин толщина слоя мальтодекстрина вокруг пептида увеличилась до 20 мкм. Средняя скорость приращения толщины слоя составила около 0,2 мкм/мин.

Проведены исследования стабильности свободного и инкапсулированного синтезированного пептида с использованием программируемого лабораторного комплекса ферментативной обработки, предназначенного для оптимизации процесса энзимного разложения лабораторных образцов белкового происхождения. После ферментирования в ротовой полости стабильность инкапсулированного пептида была выше на 61 % по сравнению со свободным пептидом. В результате исследований на модели ЖКТ (*in vitro*) установлено,

что инкапсулированный пептид достигает кишечника, где подвергается гидролизу. Стабильность пептида после 4 ч переваривания в кишечнике составляет 36 %, время высвобождения 9 ч, что в 1,8 раза выше по сравнению со свободным пептидом [53].

Клеточно-проникающие пептиды. Для повышения эффективности доставки биологических молекул через слизистую оболочку кишечника и эпителиальные клетки создают и используют клеточно-проникающие пептиды (КПП), состоящие из 4–30 аминокислот и способные проникать через клеточные мембраны [54]. КПП инкапсулируют в наночастицы для защиты их от действия агрессивных сред (например желудочного сока с низким уровнем pH и кишечных протеаз) [55]. Кроме того, КПП можно комбинировать с различными носителями лекарств, чтобы объединить их преимущества и создать инновационные многофункциональные системы доставки, повышающие стабильность препаратов при циркуляции в крови [56]. В последние годы КПП стали широко применяться для лечения различных заболеваний, включая рак, мышечную дистрофию, антипримонные заболевания, вирусные и бактериальные инфекции, а также сахарный диабет. КПП могут быть получены из ДНК- и РНК-связывающих белков, гепарин-связывающих белков, бактериальных мембранных белков, а также сигнальных пептидов [56]. База данных КПП содержит 1855 записей, в т. ч. последовательности пептидов, информацию о природе пептидов, химических модификациях, методах экспериментальной проверки, структуре пептидов и типах доставляемых веществ. В зависимости от происхождения КПП делятся на три типа: белкового происхождения, химерные и синтетические. КПП белкового происхождения получают из природных белков, которые по своей природе способны проникать через клеточные мембраны. Tat (транскрипционный активатор вируса иммунодефицита человека) – один из самых ранних и хорошо изученных примеров КПП белкового происхождения. Tat взаимодействует с протеогликаном на поверхности клетки посредством положительно заряженных аминокислотных остатков. Он эффективно доставляет лекарства в клетку без участия специфического лиганда-рецептора. Однако Tat не обладает селективностью, что ограничивает его использование в системах, необходимых для адресной пероральной доставки.

Химерные КПП синтезируются путем объединения двух различных пептидов разного происхождения. Например, транспортный белок (TPGWTLSAGYL LGKINLKAKISIL) получают путем слияния сегмента гормона галанина и мастопарана (яда осы). Синтетические КПП разрабатывают и синтезируют искусственно, поэтому их свойства (стабильность в кровотоке, устойчивость к эндолизосомальному расщеплению, повышенное поглощение клетками и чувствительность к pH) можно регулировать. Амфипатический модельный пептид (KLALKLALKALKALKLA) – синтетический

КПП, представляющий собой высокоамфильную α -спиральную структуру, которую неоднократно использовали для доставки различных биоактивных молекул в клетку посредством эндоцитоза. Глутамат и аспарат функционируют как датчики pH благодаря своей способности терять органические протоны в зависимости от pH окружающей среды. Гистидин с рKa имидазольной группы 6,5 является буферным агентом в физиологических условиях и демонстрирует эффект «протонной губки», который облегчает выход молекулы из эндолизосом. Кроме того, можно создавать новые синтетические КПП с заданными свойствами, используя соответствующее соотношение остатков глутаминовой, аспарагиновой и гистидиновой кислот [57, 58].

Целесообразно получение КПП, пептидов и рекомбинантных белков методами микробиологического синтеза на основе генной инженерии, что имеет ряд преимуществ по сравнению с производством нативных и синтезированных пептидов. К этим преимуществам относятся возможность получения продукта с высокой степенью экспрессии, безопасность, а также наличие доступного сырья и низкая стоимость [58].

В результате собственных исследований получены генетические модифицированные рекомбинантные белки, устойчивые к протеолизу в ЖКТ и предотвращающие процессы старения. Эффективность полученных белков подтверждена эксперименте *in vitro* [59]. На рисунке 2 представлены методы синтеза КПП.

КПП синтезируют двумя способами: микробиологическим и химическим синтезом. Однако получение КПП методами генной инженерии также сопряжено с трудностями, включая проблемы масштабирования до промышленного уровня из-за низкой эффективности экспрессии, сложностей очистки и низкого выхода продукта. Метод ферментации основан на использовании микроорганизмами простых питательных веществ для производства пептидов, таких как ϵ -полилизин (ϵ -PL), γ -полиглютамат (γ -PGA) и цианобактериальный пептид [60]. Микробный синтез полезен только для синтеза пептидов с природными аминокислотными остатками [61] и обычно используется для получения более длинных пептидов (> 40 аминокислот). Из-за низкого выхода и длительного времени синтеза КПП редко получают в промышленных масштабах с использованием микроорганизмов [62].

В настоящее время химический синтез является стандартным методом получения пептидов, благодаря высокой скорости, возможности включения нестандартных аминокислотных остатков и минимальному риску заражения эндотоксинами [63]. Для химического синтеза полипептидов обычно используются три способа: твердофазный пептидный синтез (ТФПС), синтез в растворе и полимеризацию с раскрытием цикла (ПРЦ) N-карбоксиангидридов α -аминокислот (НКА) (рис. 2b) [64]. ТФПС считается эталонным методом синтеза пептидов, с момента открытия эффективность его значительно возросла. Линкер, содержа-

щий реакционноспособные функциональные группы (присущие смоле или добавленные в начале синтеза), обеспечивает присоединение первой аминокислоты к смоле и предназначен для облегчения высвобождения готового пептида из смолы после завершения синтеза. При ТФПС пептиды синтезируются на смоле от C-конца к N-концу с использованием аминокислот с защищенными боковыми цепями, которые предотвращают побочные реакции в процессе соединения [65]. ТФПС обычно применяют для синтеза коротких пептидов, содержащих менее 50 аминокислотных остатков [66].

Метод фазового разделения в растворе предполагает использование короткой пептидной последовательности в качестве отправной точки для получения большего количества КПП. Поэтому этот метод всегда используется для синтеза КПП, содержащих повторяющиеся короткие последовательности (длиной от 3 до 10 аминокислотных остатков) [67].

Механизмы клеточного поглощения КПП. Отличительной особенностью КПП является их способность взаимодействовать с клеточными мембранами, тем самым обеспечивая последующую внутриклеточную трансдукцию. Эффективность клеточной трансдукции и активного таргетинга (выходящего за рамки пептид-специфических взаимодействий) зависит от размера и полярности молекул. Небольшие неполярные молекулы проникают через клеточные мембраны путем простой диффузии – процесса, для которого характерна быстрая, зависящая от концентрации и не требующая затрат энергии кинетика. Согласно исследованиям, ослабление упаковки липидных бислоев – ключевой фактор, определяющий транслокацию через мембрану с помощью КПП. Стратегическое увеличение количества гидрофобных остатков в основной цепи пептида облегчает проникновение через липофильное ядро мембраны. Исходя из предложенного механизма, КПП могут способствовать трансдукции, вызывая искривление мембраны. Кроме того, ферментативная деградация во внеклеточной среде (например под действием протеаз в ЖКТ) снижает стабильность КПП до их проникновения в клетку. Помимо свойств самих КПП, на эффективность транслокации критически влияет состав мембраны. Примечательно, что определенные липиды, такие как бис(моноацилглицерол)фосфат (ВМР), в большом количестве содержащиеся в поздних эндосомах, выступают ключевыми медиаторами выхода из эндосом – лимитирующего этапа внутриклеточной доставки [68]. Точный молекулярный механизм проникновения КПП в клетки до сих пор окончательно не установлен, хотя многие исследователи выдвигали предположения о том, как КПП проникают через плазматическую мембрану [68]. Механистические модели выявили несколько факторов, влияющих на проникновение КПП в клетки: тип клетки; масса и структура груза; способ связывания; концентрация КПП; продолжительность и температура инкубации.

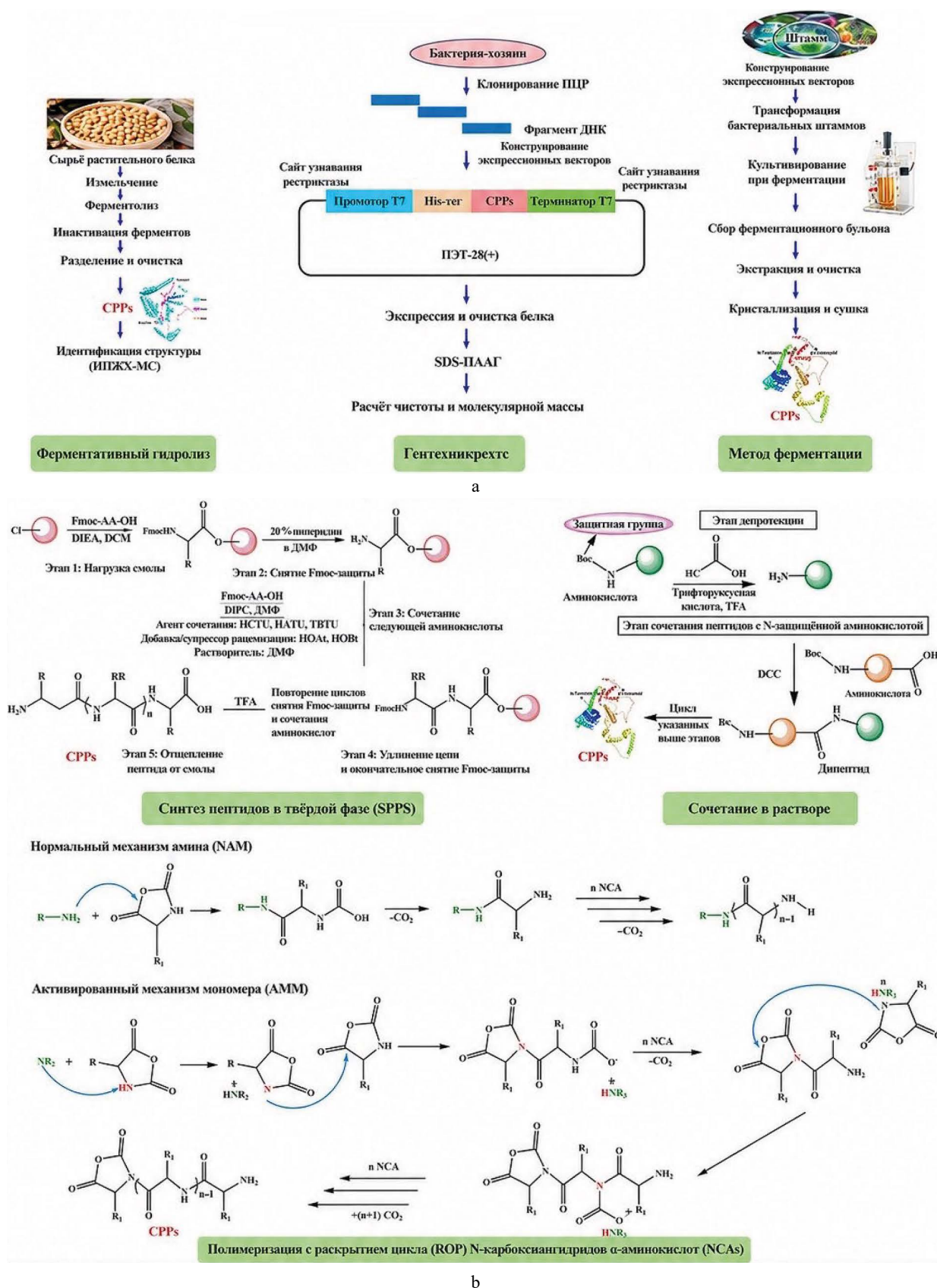


Рисунок 2. Методы синтеза клеточно-проникающих пептидов: а – микробиологический синтез; б – химический синтез

Figure 2. Methods of synthesis of cell-penetrating peptides: a – microbiological synthesis; b – chemical synthesis

Основные механизмы интернализации КПП – эндоцитоз и прямое проникновение (рис. 3) [69].

К механизмам эндоцитоза в основном относят макропиноцитоз, клатрин- и кавеолин-опосредованный эндоцитоз, клатрин- и каведин-независимый эндоцитоз. Механизмы прямого проникновения связывают с образованием инвертированных мицелл; моделью «ковра»; истончением мембраны; образованием временных пор и индукция мультиламеллярности, а также с моделью «стебель-пора».

Большинство КПП проникают в клетки через эндоцитозные пути, состоящие из двух ключевых этапов:

эндоцитоза и последующего выхода из эндосом [68]. Эндоцитоз – процесс, при котором внутриклеточные и внеклеточные вещества поглощаются путем инвагинации плазматической мембраны с образованием везикул, в которых содержится поглощенный материал [69]. Эндоцитоз представляет собой энергозависимый процесс, происходящий во всех клетках. КПП проникают в клетки преимущественно путем эндоцитоза, а не прямого проникновения, из-за быстрого обновления плазматической мембраны [70]. Эндоцитоз включает различные пути: макропиноцитоз; эндоцитоз, опосредованный клатрином / каведином,

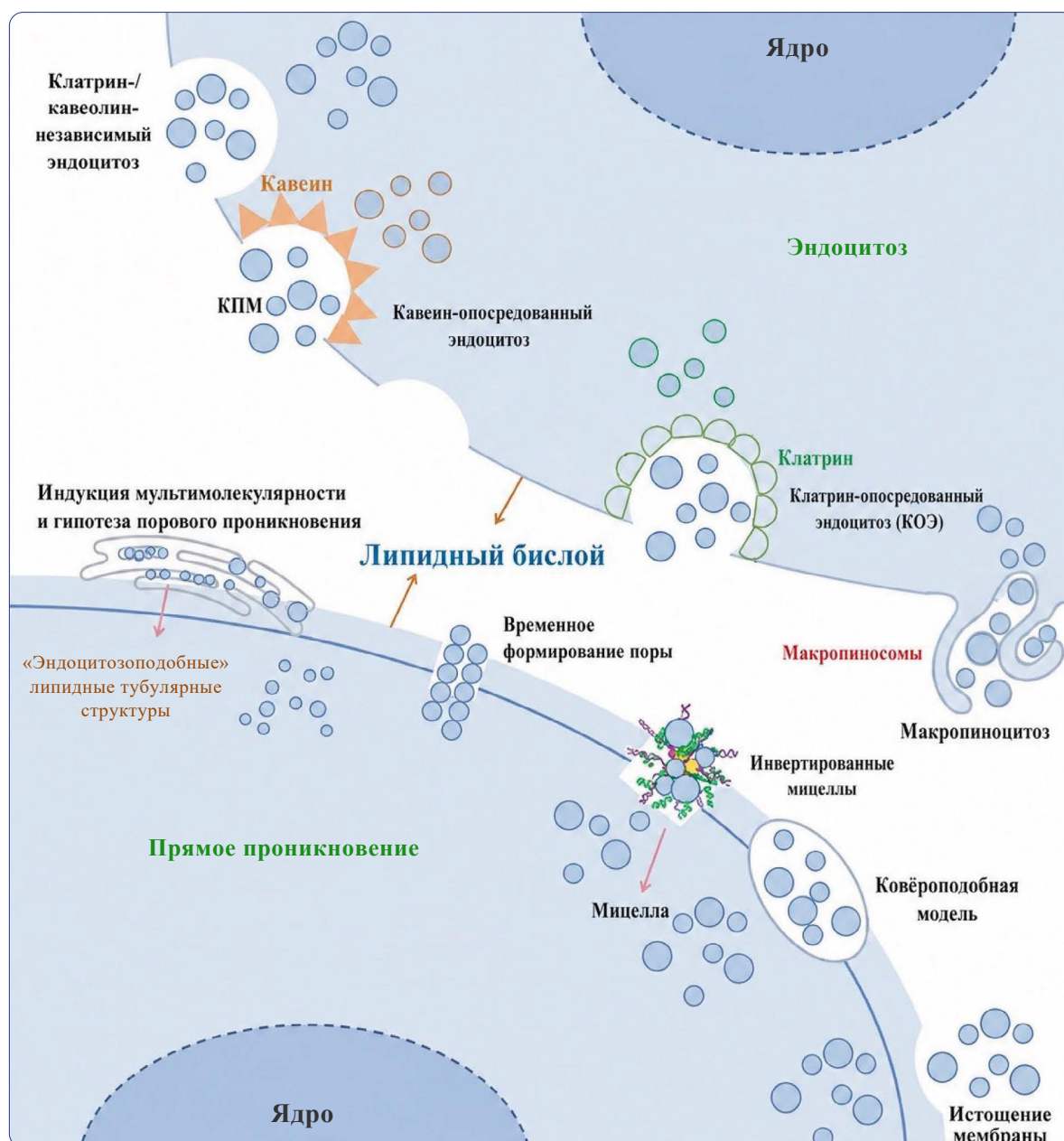


Рисунок 3. Механизмы интернализации и поглощения клеточными мембранами клеточно-проникающих пептидов [41]

Figure 3. Internalization / uptake of cell penetrating peptides by cell membranes [41]

и эндоцитоз, независимый от клатрина / каведина (рис. 3) [71]. Все эти эндоцитарные пути ингибируются в условиях истощения энергии, таких как низкая температура (4 °C) или обработка азидом натрия (NaN_3) [72].

Макропиноцитоз – уникальный клеточный процесс, который не запускается по типичному механизму мембранной инвагинации, вместо этого он возникает в результате повышенного растрепывания мембран и клеточной активации. Такая форма динамики мембраны приводит к образованию выступов, которые не захватывают частицу, покрытую лигандом, а складываются обратно, встраиваясь в плазматическую мембрану и образуя структуры, называемые макропиносомами [72]. Многочисленные экспериментальные данные указывают на важнейшую роль макропиноцитоза в проникновении в клетки различных пептидов [73]. Механизм проникновения пептида M918 через клеточную мембрану, по-видимому, включает как макропиноцитоз, так и клатрин-опосредованный эндоцитоз. Аналогичным образом пептид TP10 проникает через клеточную мембрану преимущественно посредством клатрин-опосредованного эндоцитоза [74]. Это свидетельствует о том, что механизмы клеточного поглощения сложны и многогранны.

Помимо макропиноцитоза, важную роль в поглощении пептидов нейронами играют различные эндоцитозные процессы, включая клатрин-опосредованный механизм. Пептид Tat и родственные ему переносчики зависят от кавеолин-опосредованного эндоцитоза [75]. Кроме того, ингибирование кавеолин-опосредованного пути частично подавляло поглощение Tat клетками, что указывает на участие в этом процессе и других механизмов. В комплексном исследовании показано, что Tat и pArg используют три эндоцитозных пути для клеточной транслокации: клатрин-опосредованный эндоцитоз, кавеолин-опосредованный эндоцитоз и микропиноцитоз. Однако степень участия этих путей в поглощении различается в зависимости от конкретного КПП, что подчеркивает сложность и специфичность механизмов их проникновения в клетки [76]. J. P. Richard *et al.* [77] предположили, что в поглощении КПП клетками может участвовать клатрин-зависимый путь, и продемонстрировали, что поглощение тартрата в клетках HeLa снижается на 50 % после ингибирования хлорпромазином. Общеизвестно, что КПП связываются с плазматической мембраной, прежде чем проникнуть внутрь клетки через любой из вышеупомянутых эндоцитозных путей [78]. Электростатическое взаимодействие между КПП и гликозаминогликанами представляет собой не просто пассивный процесс проникновения в клетку, а запускает эндоцитоз, вызывая агрегацию мембранных белков. Считается, что гепарансульфатные протеоглики играют ключевую роль в проникновении КПП в клетку, но их точное значение в этом процессе до сих пор не установлено [79].

Прямая транслокация богатых аргинином КПП облегчается за счет их сильного взаимодействия с по-

лярными головками липидов в плазматической мембране [80]. КПП, богатые аргинином, транслоцируются через плазматическую мембрану путем прямого проникновения [81]. При этом положительно заряженные КПП взаимодействуют с отрицательно заряженными компонентами клеточной мембраны, такими как фосфолипидный бислой и гепарансульфат. Прямое проникновение – простой одноэтапный процесс, не требующий затрат энергии [82]. Некоторые КПП интернализуются при низких температурах, что может объяснять, почему они избегают энергозависимого эндоцитоза. Хотя энергозависимый эндоцитоз считается основным путем интернализации различных КПП в клетки, появляется все больше доказательств того, что некоторые КПП интернализуются независимо от эндоцитоза. В частности, положительно заряженные остатки аргинина связываются с отрицательно заряженными липидами (например фосфатидилсерином и фосфатидилглицерином). Кроме того, гуанидиновая группа образует водородные связи с фосфатными, карбоксильными и сульфатными группами, что приводит к структурным изменениям в мембране [83]. Прямое проникновение КПП может происходить даже в присутствии криогенных и эндоцитарных ингибиторов.

КПП могут проникать в клетки с помощью пяти различных механизмов прямого проникновения: образование перевернутых мицелл; модель «ковра»; модель истончения мембран; образование временных пор и индукция мультисамеллярности в сочетании с моделью «стебель-пора» (рис. 3) [84]. Первый механизм связан с образованием перевернутых мицелл, в которых КПП собираются в агрегаты и встраиваются в липидный бислой мембраны. Модель «ковра» описывает прикрепление КПП к поверхности мембраны и нарушение липидной структуры, что позволяет им проникать через мембрану. Согласно модели истончения мембраны, КПП уменьшают ее толщину, создавая благоприятные условия для проникновения. Модель образования временных пор предполагает, что КПП взаимодействуют с липидными молекулами и образуют временные отверстия в клеточной мембране. Индукция мультисамеллярных структур и модель «стебель-пора» демонстрируют, как КПП могут способствовать формированию множества липидных слоев и временных структур, облегчающих их проникновение в клетку. Эти разнообразные пути интернализации свидетельствуют об универсальности применения КПП в клеточной доставке лекарств, функционирующих без затрат энергии [85].

Использование модифицированных микроорганизмов в качестве носителей для пероральной доставки пептидов. В последнее время в качестве инновационного подхода стали использовать пероральные микроустройства, способные защитить биопептиды от разрушения и обеспечить их контролируемое высвобождение и всасывание в ЖКТ [86]. Несмотря на перспективные разработки, каждая стратегия имеет

свои недостатки, включая возможное изменение биологической активности биопептидов, а также опасения в отношении их долгосрочной безопасности и потенциальной токсичности [87].

Данный подход, известный как усовершенствованная микробиомная терапия (Advanced Microbiome Therapeutics) или модифицированные живые биотерапевтические продукты (Engineered Live Biotherapeutic Products), рассматривается как потенциально революционный метод решения проблем, связанных с пероральным введением лекарств [88].

Усовершенствованная микробиомная терапия (УМТ) представляет собой микроорганизмы (например бактерии и дрожжи), модифицированные для адресной доставки терапевтических веществ с целью профилактики, лечения или устранения заболевания. УМТ является биологическим решением, использующим микробные системы, которые естественным образом адаптированы к среде кишечника. В отличие от традиционных лекарственных форм, часто сталки-

вающихся со значительными препятствиями в ЖКТ, УМТ используют модифицированные микробы для защиты, продукции и высвобождения терапевтических пептидов непосредственно на месте действия, что позволяет преодолеть многие ограничения перорального введения пептидов, особенно в желудке и верхних отделах кишечника. Некоторые микроорганизмы, в т. ч. несколько пробиотических штаммов, используются в терапевтических целях благодаря своим полезным свойствам, доказанной безопасности и стабильности [79].

Кроме того, возможна модификация данных систем для придания им чувствительности к специфическим стимулам (изменение pH или концентрации метаболитов), что обеспечивает не только точный контроль высвобождения лекарственного средства [80], но и пролонгированное высвобождение биофармацевтических препаратов, особенно пептидов и белков (рис. 4).

Такой результат достигается с помощью систем конститутивной экспрессии, в которых используются

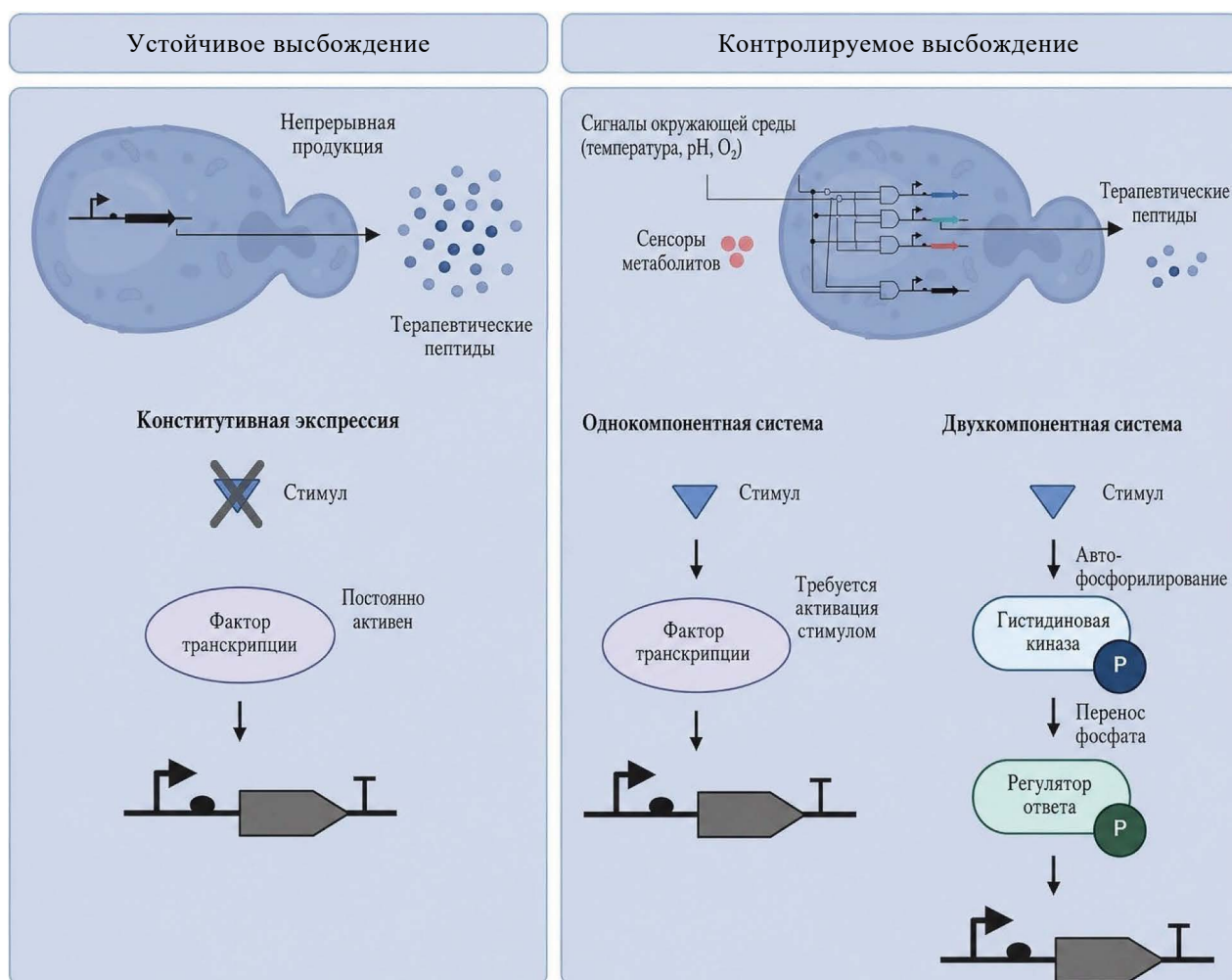


Рисунок 4. Схема непрерывного и контролируемого высвобождения терапевтических пептидов в адипоцитах [80]

Figure 4. Continuous and controlled release of therapeutic peptides in adipocytes [80]

промоторы, обеспечивающие непрерывную транскрипцию целевого гена независимо от условий окружающей среды. Уровень терапевтической продукции белка в таких системах конститутивной экспрессии во многом определяется элементами контроля транскрипции и трансляции. На уровне транскрипции сила промотора зависит от эффективности задействования клеточных механизмов транскрипции. Сильные промоторы эффективнее распознаются РНК-полимеразой, что приводит к более частой инициации синтеза мРНК, тогда как слабые промоторы обеспечивают менее частую транскрипцию. Сила промотора определяется его последовательностью ДНК, которая влияет на прочность и частоту связывания РНК-полимеразы с ДНК и инициацию транскрипции. Это напрямую определяет количество мРНК, доступной для трансляции в белок. Следовательно, выбор подходящего промотора является ключевым фактором для достижения желаемого уровня экспрессии белка [91]. Такие системы протестированы *in vivo* на грызунах с использованием бактерий и дрожжей [92]. Изучено множество конститутивных промоторов для экспрессии белков в распространенных штаммах УМТ, таких как *Lactococcus lactis*, *E. coli* [95] и *Saccharomyces boulardii* [94]. На трансляционном уровне последовательности рибосомного сайта связывания (РСС) контролируют эффективность привлечения рибосом к мРНК, влияя на скорость синтеза белка [95]. Рибосомный сайт связывания – короткая последовательность, расположенная непосредственно перед стартовым кодоном. Он часто включает в себя последовательность Шайна – Далгарно, которая помогает рибосоме занять правильное положение на матричной РНК. Эта последовательность образует пару с комплементарной областью на 16S рРНК рибосомы, что позволяет рибосоме правильно ориентироваться и начинать трансляцию. Вариации в последовательности рибосомного сайта связывания и его расположении относительно стартового кодона влияют на силу и стабильность связывания рибосомы, тем самым регулируя эффективность инициации трансляции. Таким образом, выбор подходящей последовательности РСС является ключевым фактором для достижения желаемого уровня экспрессии белка [96]. Для остановки транскрипции в нужном месте используют сконструированные терминаторы транскрипции, которые предотвращают непреднамеренное считывание нижележащих генов и обеспечивают точный контроль экспрессии генов. В совокупности эти молекулярные инструменты повышают способность модифицированных микроорганизмов выступать в качестве надежных и стабильных источников терапевтических пептидов [97].

Разрабатываются белковые препараты для перорального приема с пролонгированным высвобождением действующего начала, которые обладают рядом преимуществ: снижение частоты приема, уменьшение

побочных эффектов и улучшение соотношения эффективности и дозы [98]. Также создаются материалы с модифицированной поверхностью [99]: такие препараты содержат лекарственные вещества в биоразлагаемой матрице, которая постепенно разрушается. Однако разработка препаратов с пролонгированным высвобождением белков сопряжена с трудностями из-за их сложной структуры. Кроме того, белки подвержены денатурации [100] и агрегации, что может повышать их иммуногенность. В отличие от традиционных систем пролонгированного высвобождения, основанных на контролируемой деградации синтетических матриц, матриксные металлопротеиназы обеспечивают пролонгированное высвобождение за счет непрерывного синтеза и секреции пептидов или белков *in situ* в течение длительного времени [100].

Несмотря на перспективы, клиническое применение пероральных антимикробных препаратов на основе низкомолекулярных соединений ограничено нормативными, производственными и биологическими факторами. Нормативная неопределенность связана с тем, что антимикробные препараты представляют собой новый терапевтический класс, не имеющий аналогов. Производство также сопряжено с серьезными трудностями, поскольку антимикробные препараты должны производиться в больших объемах с неизменным качеством, быть стабильными в течение длительного времени и сохранять жизнеспособность при пероральном приеме [101, 102]. Кроме того, биологическая сложность взаимодействий между хозяином и микробиомом, а также патология заболевания затрудняют проектирование и оценку УМТ [103]. Эти препараты сталкиваются с высокоизменчивой средой ЖКТ и различиями в микробиоте между пациентами. Часто отсутствует четкое понимание механизмов развития заболевания и надежных биомаркеров, что затрудняет прогнозирование и количественную оценку терапевтических эффектов, а также определение зависимости «доза – реакция» [104]. Так, многие препараты-кандидаты для антимикробной терапии, продемонстрировавшие эффективность *in vitro* или на животных моделях, не показали аналогичной эффективности у человека, а клинические испытания часто прекращались из-за отсутствия терапевтического эффекта. Это несоответствие в трансляционной медицине подчеркивает сложность разработки клинических испытаний для методов лечения, основанных на УМТ, которые должны учитывать такие сложные конечные точки, как приживление микроорганизмов, иммунологические изменения в организме хозяина и т. д., а также высокую вариативность, сохраняя при этом строгий контроль и слепой метод [105].

Несмотря на это, разрабатывается несколько стратегий для преодоления существующих барьеров и ускорения внедрения в клиническую практику методов амплификации матриксных белков. Исследователи создают генетические конструкции, которые позволяют точно

реализовывать терапевтические эффекты в зависимости от заболевания с помощью проверенных биосенсоров и логических элементов [106, 107]. Биобезопасность остается одним из приоритетов при разработке методов амплификации матричных белков. Для ограничения выживания вне предполагаемой среды обитания используются такие стратегии, как «выключатели» и ауксотрофная зависимость [108]. Изучаются более совершенные многоуровневые системы сдерживания, в т. ч. генные цепи, которые запускают самоуничтожение по завершении терапии или при выходе из среды обитания [109]. Также предпринимаются попытки вывести облигатные анаэробы и комменсальные штаммы, которые лучше подходят для колонизации кишечника человека [110, 111]. Физическая изоляция с помощью передовых технологий доставки, таких как pH-чувствительные капсулы и системы с магнитным управлением, обеспечивает дополнительный уровень адресности и безопасности, повышая эффективность колонизации и снижая нецелевые эффекты [112]. В дополнение к экспериментальным подходам используются вычислительные инструменты, позволяющие моделировать физиологию кишечника, динамику микробиоты и терапевтическую кинетику. В сочетании с мультиомиксными данными и машинным обучением эти модели потенциально могут обеспечить *in silico* оптимизацию дозировки, колонизации и эффективности, что, возможно, сделает доклинические испытания более прогностичными для результатов у человека [113].

Создание пептидов на основе наночастиц. Разрабатываются белки и пептиды на основе наночастиц, в частности для пероральной доставки инсулина. В последнее время появилось множество наноносителей, в т. ч. на основе липидов (липосомы, мицеллы); углеродные нанотрубки; неорганические наноносители (квантовые точки); наночастицы золота и полимерные наночастицы (полисахариды, белки, пептиды, нуклеиновые кислоты, металлоорганические каркасные структуры и пористые органические полимеры) [114]. Несмотря на то что наночастицы защищают инкапсулированные белковые препараты от кислотной денатурации и ферментативного разрушения, их применение в системах пероральной доставки инсулина по-прежнему ограничено несколькими факторами. Во-первых, вязкий полупроницаемый слизистый слой служит первичным барьером для диффузии наночастиц к поверхности кишечного эпителия [115]. Во-вторых, плотные контакты, соединяющие эпителиальные клетки кишечника, значительно препятствуют проникновению макромолекул через межклеточные щели. В-третьих, большой размер и гидрофильность макромолекул также затрудняют их трансклеточное прохождение [115].

Стратегии разработки пептидов для перорального введения. В настоящее время разработаны стратегии создания пептидов для перорального введения (рис. 5, 6 и 7) [89]. Для этой цели используются ингибиторы протеаз и усилители проницаемости.

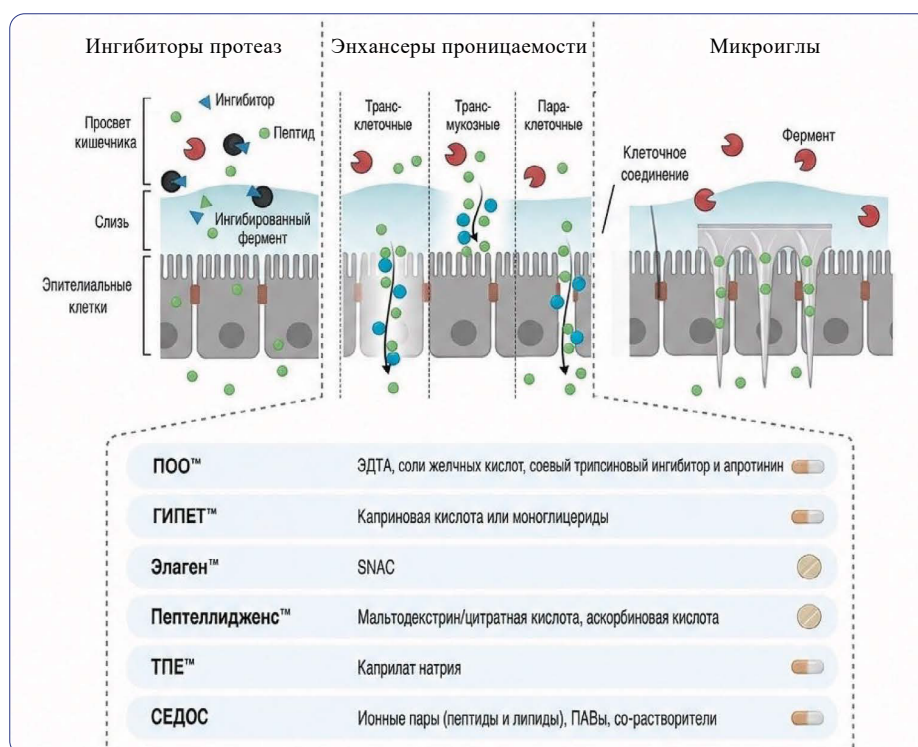


Рисунок 5. Стратегии пероральной доставки пептидов [116]

Figure 5. Strategies for oral peptide delivery [116]



Рисунок 6. Энхансеры проницаемости для пероральной доставки пептидов [116]

Figure 6. Permeation enhancers for oral peptide delivery [116]

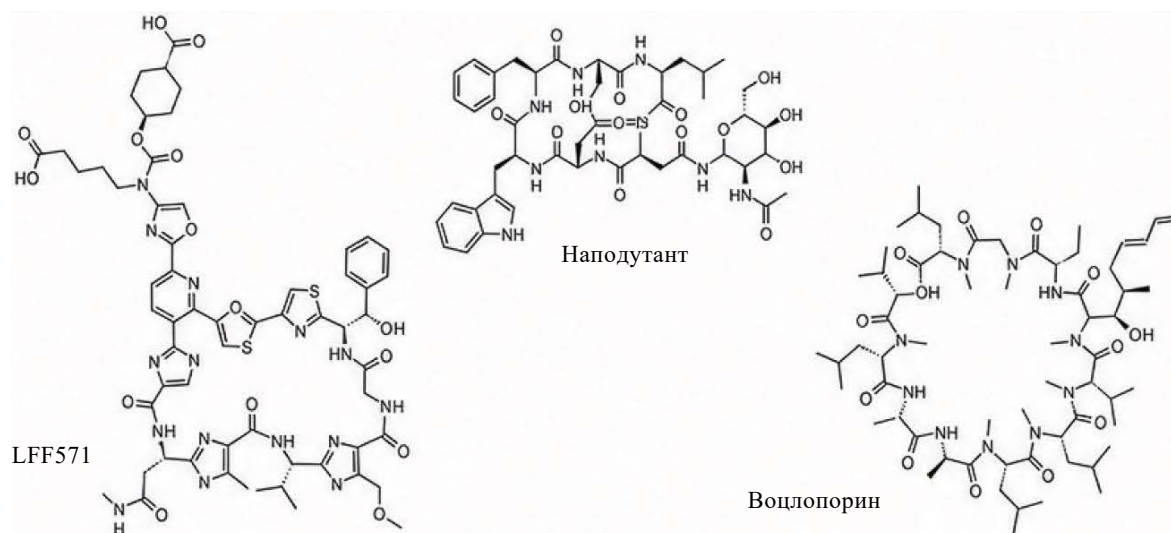


Рисунок 7. Химическая модификация и циклизация пептидов для перорального введения [116]

Figure 7. Chemical modification and cyclization of peptides for oral administration [116]

Общая информация	
Имя	[Nphe5]SFTI-1
Последовательность	GRCTXSIPPICFFD
Класс	BBI-подобный ингибитор трипсина
Средняя масса	1547.70
Моноизотопная масса	0
m/z M +H	0
Тип белка	Мутант
Родитель	SFTI-1
Организм	Синтетический
Примечания	N-SFTI-1-C с Lys5, замещенным остатком N-бензилглицина.

Рисунок 8. Белковая карта пептида [Nphe5]SFTI-1(100)

Figure 8. Protein map of the [Nphe5]SFTI-1 peptide(100)

Последние (салкапрозат натрия (SNAC), соли желчных кислот и каприлат натрия) обеспечивают прохождение молекулы через слизистый слой, клеточные мембраны и плотные контакты. Химическая модификация и циклизация являются эффективными инструментами для изменения физико-химических свойств пептидов, а также применяются для перорального введения пептидов.

В результате исследований с использованием стратегии разработаны и синтезированы пептиды и рекомбинантный белок для перорального применения. При раз-

работке использована циклизация пептидов и применение циклических каркасов из базы данных циклических пептидов. В качестве каркаса использован циклический синтезированный пептид из базы Cybase с номером [Nphe5]SFTI-1(100) (рис. 8).

Теоретическим обоснованием использования известного циклического пептида в качестве каркаса является то, что по данным Cybase, он устойчив к действию протеаз и получен в результате синтеза, что позволяет его использовать без выделения из сырья или гидролиза белка.

В результате молекулярно-пептидной трансплантации биологически активных последовательностей в устойчивый к протеолизу циклический пептид [Nphe5] SFTI-1(100) получены новые циклические пептиды и доказано их биологическое действие в экспериментах *in vitro*: нейропротекторный пептид с условным названием GD-20 и CC-18; антитромбиновый пептид (QW-13); пептид, регулирующий метаболизм липидов (CG-16); иммуномодулирующий пептид (CD-17), а также рекомбинантный белок, устойчивый к протеолизу и предупреждающий процессы старения.

Выводы

За последнее время разработано множество решений для пероральной доставки терапевтических препаратов белковой природы, однако в пищевой отрасли достижения фармацевтической биотехнологии используются не в полном объеме. В перспективе разработка систем доставки биопептидов для перорального применения в составе пищевых продуктов может стать стратегическим направлением развития биотехнологии, способным дополнить существующие подходы к профилактике и лечения различных заболеваний, а также

снизить риск осложнений. Для ускорения внедрения продуктов будущего в клиническую практику необходимо усилить междисциплинарное сотрудничество между вузами, научными учреждениями и биотехнологическими компаниями, а также вести непрерывный диалог с законодательной властью для усовершенствования нормативной базы, регулирующей применение новых продуктов питания.

Критерии авторства

Все авторы внесли эквивалентный вклад в подготовку исследования.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution

All authors made equivalent contributions to the research.

Conflict of interest

The authors state that there is no conflict of interest.

Список литературы / Reference

1. Wu J, Roesger S, Jones N, Hu C-MJ, Li SD. Cell-penetrating peptides for transmucosal delivery of proteins. *Journal of Controlled Release*. 2024;366:864–878. <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2024.01.038>
2. Pang H, Huang X, Xu ZP, Chen C, Han FY. Progress in oral insulin delivery by PLGA nanoparticles for the management of diabetes. *Drug Discovery Today*. 2023;28(1):103393. <https://doi.org/10.1016/j.drudis.2022.103393>
3. Wang YY, Li H, Rasool A, Wang HB, Manzoor R, *et al.* Polymeric nanoparticles (PNPs) for oral delivery of insulin. *Journal of Nanobiotechnol*. 2024;22(1):1. <https://doi.org/10.1186/s12951-023-02253-y>
4. Salama NN, Eddington ND, Fasano A. Tight junction modulation and its relationship to drug delivery. *Advanced Drug Delivery Reviews*. 2006;58(1):15–28. <https://doi.org/10.1016/j.addr.2006.01.003>
5. Zou J-J, Wei G, Xiong C, Yu Y, Li S, *et al.* Efficient oral insulin delivery enabled by transferrin-coated acid-resistant metal-organic framework nanoparticles. *Science Advances*. 2022;8(8):eabm4677. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abm4677>
6. Zhu X, Shan W, Zhang P, Yun J, Shan G, *et al.* Penetratin derivative-based nanocomplexes for enhanced intestinal insulin delivery. *Molecular Pharmaceutics*. 2014;11(2):317–328. <https://doi.org/10.1021/mp400493b>
7. Smart AL, Gaisford S, Basit AW. Oral peptide and protein delivery: Intestinal obstacles and commercial prospects. *Expert Opinion on Drug Delivery*. 2014;11(8):1323–1335. <https://doi.org/10.1517/17425247.2014.917077>
8. Goldberg M, Gomez-Orellana I. Challenges for the oral delivery of macromolecules. *Nature Reviews Drug Discovery*. 2003;2(4):289–295. <https://doi.org/10.1038/nrd1067>
9. Drucker DJ. Advances in oral peptide therapeutics. *Nature Reviews Drug Discovery*. 2020;19(4):277–289. <https://doi.org/10.1038/s41573-019-0053-0>
10. Han Y, Gao Z, Chen L, Kang L, Huang W, *et al.* Multifunctional oral delivery systems for enhanced bioavailability of therapeutic peptides/proteins. *Acta Pharmaceutica Sinica B*. 2019;9(5):902–922. <https://doi.org/10.1016/j.apsb.2019.01.004>
11. Miao Y-B, Xu T, Gong Y, Chen A, Zou L, *et al.* Cracking the intestinal lymphatic system window utilizing oral delivery vehicles for precise therapy. *Journal of Nanobiotechnology*. 2023;21:263. <https://doi.org/10.1186/s12951-023-01991-3>
12. Dubey SK, Parab S, Dabholkar N, Singhvi G, Argrawal M, *et al.* Oral peptide delivery: Challenges and the way ahead. *Drug Discovery Today*. 2021;26(4):931–950. <https://doi.org/10.1016/j.drudis.2021.01.001>
13. Fallingborg J. Intraluminal pH of the human gastrointestinal tract. *Danish Medical Bulletin*. 1999;46(3):183–196. <https://elibrary.ru/YCCJSX>
14. Chen G, Kang W, Li W, Chen S, Gao Y. Oral delivery of protein and peptide drugs: From non-specific formulation approaches to intestinal cell targeting strategies. *Theranostics*. 2022;12(3):1419–1439. <https://doi.org/10.7150/thno.61747>

15. Buckley ST, Bækdal TA, Vegge A, Maarbjerg SJ, Knudsen LB, *et al.* Transcellular stomach absorption of a derivatized glucagon-like peptide-1 receptor agonist. *Science Translational Medicine*. 2018;10(467):eaar7047. <https://doi.org/10.1126/scitranslmed.aar7047>
16. Johansson MEV, Thomsson KA, Hansson GC. Proteomic analyses of the two mucus layers of the colon barrier reveal that their main component, the Muc2 mucin, is strongly bound to the Fcgbp protein. *Journal of Proteome Research*. 2009;8(7):3549–3557. <https://doi.org/10.1021/pr9002504>
17. Leon DL, Crouzier T, Sarkar A, Dunphy L, Han J, *et al.* Spatial configuration and composition of charge modulates transport into a mucin hydrogel barrier. *Biophysical Journal*. 2013;105(6):1357–1365. <https://doi.org/10.1016/j.bpj.2013.07.050>
18. Brunner J, Ragupathy S, Borchard G. Target specific tight junction modulators. *Advanced Drug Delivery Reviews*. 2021;171:266–288. <https://doi.org/10.1016/j.addr.2021.02.008>
19. Yang NJ, Hinner MJ. Getting across the cell membrane: An overview for small molecules, peptides, and proteins. *Methods in Molecular Biology*. 2015;1266:29–53. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2272-7_3
20. Kristensen M, Nielsen HM. Cell-penetrating peptides as carriers for oral delivery of biopharmaceuticals. *Basic & Clinical Pharmacology & Toxicol*. 2016;118(2):99–106. <https://doi.org/10.1111/bcpt.12515>
21. Salamat-Miller N, Johnston TP. Current strategies used to enhance the paracellular transport of therapeutic polypeptides across the intestinal epithelium. *International Journal of Pharmaceutics*. 2005;294(1–2):1–19. <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2005.01.022>
22. Lee B, Moon KM, Kim CY. Tight junction in the intestinal epithelium: Its association with diseases and regulation by phytochemicals. *Journal of Immunology Research*. 2018;2018:2645465. <https://doi.org/10.1155/2018/2645465>
23. Antosova Z, Mackova M, Kral V, Macek T. Therapeutic application of peptides and proteins: Parenteral forever? *Trends in Biotechnology*. 2009;27(11):628–635. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2009.07.009>
24. Ensign LM, Cone R, Hanes J. Oral drug delivery with polymeric nanoparticles: The gastrointestinal mucus barriers. *Advanced Drug Delivery Reviews*. 2012;64(6):557–570. <https://doi.org/10.1016/j.addr.2011.12.009>
25. Canales C, Shleider C, Roque-Borda A, Cazorla JIM, Cazorla RMM, *et al.* Forging a new frontier: Antimicrobial peptides and nanotechnology converging to conquer gastrointestinal pathogens. *Small*. 2025;21(26):e2501431. <https://doi.org/10.1002/smll.202501431>
26. Zarrintaj P, Ghorbani S, Barani M, Chauhan NPS, Yazdi MK, *et al.* Polylysine for skin regeneration: A review of recent advances and future perspectives. *Bioengineering & Translational Medicine*. 2021;7(1):e10261. <https://doi.org/10.1002/btm2.10261>
27. Yaghmur A, Mu H. Recent advances in drug delivery applications of cubosomes, hexosomes, and solid lipid nanoparticles. *Acta Pharmaceutica Sinica B*. 2021;11(4):871–885. <https://doi.org/10.1016/j.apsb.2021.02.013>
28. Jansook P, Fülöp Z, Ritthidej GC. Amphotericin B loaded solid lipid nanoparticles (SLNs) and nanostructured lipid carrier (NLCs): Physicochemical and solid-solution state characterizations. *Drug Development and Industrial Pharmacy*. 2019;45(4):560–569. <https://doi.org/10.1080/03639045.2019.1569023>
29. Su L, Zhou F, Yu M, Ge R, He J, *et al.* Solid lipid nanoparticles enhance the resistance of oat-derived peptides that inhibit dipeptidyl peptidase IV in simulated gastrointestinal fluids. *Journal of Functional Foods*. 2020;65:103773. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2019.103773>
30. Salvi VR, Pawar P. Nanostructured lipid carriers (NLC) system: A novel drug targeting carrier. *Journal of Drug Delivery Science and Technology*. 2019;51:255–267. <https://doi.org/10.1016/j.jddst.2019.02.017>
31. Elmowafy M, Al-Sanea MM. Nanostructured lipid carriers (NLCs) as drug delivery platform: Advances in formulation and application. *Saudi Pharmaceutical Journal*. 2021;29(9):999–1013. <https://doi.org/10.1016/j.jsps.2021.07.015>
32. Jain P, Rahi P, Pandey V, Asati S, Soni V. Nanostructured lipid carriers: A modish contrivance to overcome the ultraviolet effects. *Egyptian Journal of Basic and Applied Sciences*. 2017;4(2):89–100. <https://doi.org/10.1016/j.ejbas.2017.02.001>
33. Nelson AL, Mancino C, Gao X, Choe JA, Chubb L, *et al.* β -catenin mRNA encapsulated in SM-102 lipid nanoparticles enhances bone formation in a murine tibia fracture repair model. *Bioactive Materials*. 2024;39:273–286. <https://doi.org/10.1016/j.bioactmat.2024.05.020>
34. Akbari A, Saeedi M, Ahmadi F, Hashemi SMH, Babaei A, *et al.* Solid lipid nanoparticles and nanostructured lipid carriers: a review of the methods of manufacture and routes of administration. *Pharmaceutical Development and Technology*. 2022;27(5):525–539. <https://doi.org/10.1080/10837450.2022.2084554>
35. Chauhan I, Yasir M, Verma M, Singh AP. Nanostructured lipid carriers: A platform to lipophilic drug for oral bioavailability enhancement. *Advanced Pharmaceutical Bulletin*. 2020;10(2):150–165. <https://doi.org/10.34172/apb.2020.021>
36. Ehlers APF, Bartholomä J, Menghin D. Rechtliche Regelung der „Triage“ – Gesundheitssysteme an ihren Grenzen. *Medizinrecht*. 2021;39(5):416–423. [Ehlers APF, Bartholomä J, Menghin D. Legal regulation of „Triage“ health care systems at their borders. *Medical Law*. 2021;39(5):416–423. (In German)] <https://doi.org/10.1007/s00350-021-5874-2>
37. Fernández-Barat L, Ciofu O, Kragh KN, Pressler T, Johansen U, *et al.* Phenotypic shift in *Pseudomonas aeruginosa* populations from cystic fibrosis lungs after 2-week antipseudomonal treatment. *Journal of Cystic Fibrosis*. 2017;16:222–229. <https://doi.org/10.1016/j.jcf.2016.08.005>

38. Rehman KU, Zaman U, Alem A, Khan D, Khattak NS, *et al.* Alkaline protease functionalized hydrothermal synthesis of novel gold nanoparticles (ALPs-AuNPs): A new entry in photocatalytic and biological applications. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2024;265:131067. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.131067>
39. Silva APB, Roque-Borda CA, Carnero Canales CS, Duran Gleriani Primo LM, Silva IC, *et al.* Activity of bacteriophage D29 loaded on nanoliposomes against macrophages infected with *Mycobacterium tuberculosis*. *Diseases*. 2023;11(4):150. <https://doi.org/10.3390/diseases11040150>
40. Almeida A, Souto E. Solid lipid nanoparticles as a drug delivery system for peptides and proteins. *Advanced Drug Delivery Reviews*. 2007;59(6):478–490. <https://doi.org/10.1016/j.addr.2007.04.007>
41. Thapa RK, Diep DB, Tønnesen HH. Nanomedicine-based antimicrobial peptide delivery for bacterial infections: Recent advances and future prospects. *Journal of Pharmaceutical Investigation*. 2021;51(4):377–398. <https://doi.org/10.1007/s40005-021-00525-z>
42. Makowski M, Silva ÍC, Pais do Amaral C, Gonçalves S, Santos NC. Advances in lipid and metal nanoparticles for antimicrobial peptide delivery. *Pharmaceutics*. 2019;11(11):588. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics11110588>
43. Cantor S, Vargas L, Rojas A, Yarce C, Salamanca C, *et al.* Evaluation of antimicrobial peptide incorporated liposomes coated with Eudragit E-100 against foodborne pathogens. *International Journal of Molecular Sciences*. 2019;20(3):680. <https://doi.org/10.3390/ijms20030680>
44. Alzahrani NM, Booq RY, Aldossary AM, Bakr AA, Almughem FA, *et al.* Liposome-encapsulated tobramycin and IDR-1018 peptide mediated biofilm disruption and enhanced antimicrobial activity against *Pseudomonas aeruginosa*. *Pharmaceutics*. 2022;14(5):960. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics14050960>
45. Zhao H, Sun J, Cheng Y, Nie S, Li W. Advances in peptide/polymer antimicrobial assemblies. *Journal of Materials Chemistry B*. 2025;13(5):1518–1530. <https://doi.org/10.1039/D4TB02144D>
46. Spirescu VA, Chircov C, Grumezescu AM, Andronescu E. Polymeric nanoparticles for antimicrobial therapies: An up-to-date overview. *Polymers (Basel)*. 2021;13(5):724. <https://doi.org/10.3390/polym13050724>
47. Fredenberg S, Wahlgren M, Reslow M, Axelsson A. The mechanisms of drug release in poly(lactic-co-glycolic acid)-based drug delivery systems – a review. *International Journal of Pharmaceutics*. 2011;415(1–2):34–52. <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2011.05.049>
48. Sur S, Rathore A, Dave V, Reddy KR, Chouhan RS, *et al.* Recent developments in functionalized polymer nanoparticles for drug delivery. *Nano-Structures & Nano-Objects*. 2019;20:100397. <https://doi.org/10.1016/j.nanoso.2019.100397>
49. Giordani B, Basnet P, Mishchenko E, Luppi B, Škalko-Basnet N. Utilizing liposomal quercetin and gallic acid in localized treatment of vaginal *Candida* infections. *Pharmaceutics*. 2020;12:9. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics12010009>
50. Muthukrishnan L. Nanonutraceuticals – challenges and novel nano-based carriers for effective delivery and enhanced bioavailability. *Food and Bioprocess Technology*. 2022;15:2155–2184. <https://doi.org/10.1007/s11947-022-02807-2>
51. Zhuo S, Zhang F, Yu J, Zhang X, Yang G, *et al.* pH-sensitive biomaterials for drug delivery. *Molecules*. 2020;25(23):5649. <https://doi.org/10.3390/molecules25235649>
52. Roque-Borda CA, Saraiva MSM, Macedo Junior WD, Márquez Montesinos JCE, Meneguín AB, *et al.* Chitosan and HPMCAS double-coating as protective systems for alginate microparticles loaded with Ctx(Ile²¹)-Ha antimicrobial peptide to prevent intestinal infections. *Biomaterials*. 2023;293:121978. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2022.121978>
53. Тихонов С. Л., Чернуха И. М. Функциональная направленность природных и синтезированных биопептидов. Екатеринбург: Уральский государственный лесотехнический университет и Уральский государственный аграрный университет, 2024. 212 с. [Tikhonov SL, Chernukha IM. Functional orientation of natural and synthesized biopeptides. Yekaterinburg: Ural State Forestry Engineering University and Ural State Agrarian University; 2024. 212 p. (In Russ.)]
54. Raucher D, Ryu JS. Cell-penetrating peptides: Strategies for anticancer treatment. *Trends in Molecular Medicine*. 2015;21(9):560–570. <https://doi.org/10.1016/j.molmed.2015.06.005>
55. Douat C, Aisenbrey C, Antunes S, Decossas M, Lambert O, *et al.* A cell-penetrating foldamer with a bio-reducible linkage for intracellular delivery of DNA. *Angewandte Chemie International Edition*. 2015;54(38):11133–11137. <https://doi.org/10.1002/anie.201504884>
56. Xie J, Bi Y, Zhang H, Dong S, Teng L, *et al.* Cell-penetrating peptides in diagnosis and treatment of human diseases: From preclinical research to clinical application. *Frontiers in Pharmacology*. 2020;11:697. <https://doi.org/10.3389/fphar.2020.00697>
57. Copolovici DM, Langel K, Eriste E, Langel U. Cell-penetrating peptides: Design, synthesis, and applications. *ACS Nano*. 2014;8(3):1972–1994. <https://doi.org/10.1021/nn4057269>
58. Wang T, Li H, Liang C, Sun S, Liu A, *et al.* Purification and characterization of a novel antioxidant Phelligradin LA produced by *Inonotus baumii*. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*. 2020;95(9):2483–2494. <https://doi.org/10.1002/jctb.6430>
59. Валиева Ш. С., Тихонов С. Л., Тихонова Н. В., Тимофеева М. С., Ногина А. А. Синтез и экспрессия устойчивого к протеолизу, предупреждающего процессы старения нового рекомбинантного пищевого белка. АПК России. 2024. Т. 31. № 4. С. 607–613. [Valieva SS, Tikhonov SL, Tikhonova NV, Timofeeva MS, Nogina AA. Synthesis and expression of

a new recombinant food protein resistant to proteolysis and preventing aging processes. *Agro-Industrial Complex of Russia*. 2024;31(4):607–613. (In Russ.)] <https://doi.org/10.55934/2587-8824-2024-31-4-607-613>

60. Zenin V, Tsedilin A, Yurkova M, Siniavin A, Fedorov A. Thermostable chaperone-based polypeptide biopolymer. *PLOS One*. 2023;18(6):e0286752. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0286752>

61. Deng C, Wu J, Cheng R, Meng F, Klok H-A, et al. Functional polypeptide and hybrid materials: Precision synthesis via α -amino acid N-carboxyanhydride polymerization and emerging biomedical applications. *Progress in Polymer Science*. 2014;39(2):330–364. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2013.10.008>

62. Collins JM, Singh SK, White TA, Cesta DJ, Simpson CL, et al. Total wash elimination for solid phase peptide synthesis. *Nature Communications*. 2023;14(1):8168. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-44074-5>

63. Liu Y, Li D, Ding J, Chen X. Controlled synthesis of polypeptides. *Chinese Chemical Letters*. 2020;31(12):3001–3014. <https://doi.org/10.1016/j.cclet.2020.04.029>

64. Varnava KG, Sarojini V. Making solid-phase peptide synthesis greener: A review of the literature. *Chemistry an Asian Journal*. 2019;14(8):1088–1097. <https://doi.org/10.1002/asia.201801807>

65. Lee YS. Gram-scale preparation of C-terminal-modified enkephalin analogues by typical liquid-phase peptide synthesis. *Current Protocols in Protein Science*. 2019;98(1):e97. <https://doi.org/10.1002/cpps.97>

66. Xu J, Wang F, Ye L, Wang R, Zhao L, et al. Penetrating peptides: Applications in drug delivery. *Journal of Drug Delivery Science and Technology*. 2023;84:104475. <https://doi.org/10.1016/j.jddst.2023.104475>

67. Kang Z, Ding G, Meng Z, Meng Q. The rational design of cell-penetrating peptides for application in delivery systems. *Peptides*. 2019;121:170149. <https://doi.org/10.1016/j.peptides.2019.170149>

68. Ruseska I, Zimmer A. Internalization mechanisms of cell-penetrating peptides. *Beilstein Journal of Nanotechnology*. 2020;11:101–123. <https://doi.org/10.3762/bjnano.11.10>

69. Cheng X, Chen K, Dong B, Yang M, Filbrun SL, et al. Dynamin-dependent vesicle twist at the final stage of clathrin-mediated endocytosis. *Nature Cell Biology*. 2021;23(8):859–869. <https://doi.org/10.1038/s41556-021-00713-x>

70. Liu Y, Shen Z, Xu Y, Zhu Y-W, Chen W, et al. Layer-by-layer self-assembly of PLL/CPP-ACP multilayer on SLA titanium surface: Enhancing osseointegration and antibacterial activity *in vitro* and *in vivo*. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*. 2024;240:113966. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2024.113966>

71. Salloum G, Bresnick AR, Backer JM. Macropinocytosis: Mechanisms and regulation. *Biochemical Journal*. 2023;480(5):335–362. <https://doi.org/10.1042/bcj20210584>

72. Kim GC, Cheon DH, Lee Y. Challenge to overcome current limitations of cell-penetrating peptides. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) – Proteins and Proteomics*. 2021;1869(4):140604. <https://doi.org/10.1016/j.bbapap.2021.140604>

73. Kaplan IM, Wadia JS, Dowdy SF. Cationic TAT peptide transduction domain enters cells by macropinocytosis. *Journal of Controlled Release*. 2005;102(1):247–253. <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2004.10.018>

74. Eiríksdóttir E, Mäger I, El Andaloussi S, Langel U, Lehto T. Cellular internalization kinetics of (luciferin-) cell-penetrating peptide conjugates. *Bioconjugate Chemistry*. 2010;21(9):1662–1672. <https://doi.org/10.1021/bc100174y>

75. Fittipaldi A, Ferrari A, Zoppé M, Arcangeli C, Pellegrini V, et al. Cell membrane lipid rafts mediate caveolar endocytosis of HIV-1 Tat fusion proteins. *Journal of Biological Chemistry*. 2003;278(36):34141–34149. <https://doi.org/10.1074/jbc.M303045200>

76. Mäger I, Langel K, Lehto T, Eiríksdóttir E, Langel Ü. The role of endocytosis on the uptake kinetics of luciferin-conjugated cell-penetrating peptides. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) – Biomembranes*. 2012;1818(3):502–511. <https://doi.org/10.1016/j.bbamem.2011.11.020>

77. Richard JP, Melikov K, Brooks H, Prevot P, Lebleu B, et al. Cellular uptake of unconjugated TAT peptide involves clathrin-dependent endocytosis and heparan sulfate receptors. *Journal of Biological Chemistry*. 2005;280(15):15300–15306. <https://doi.org/10.1074/jbc.M401604200>

78. Nakase I, Tadokoro A, Kawabata N, Takeuchi T, Katoh H, et al. Interaction of arginine-rich peptides with membrane-associated proteoglycans is crucial for induction of actin organization and macropinocytosis. *Biochemistry*. 2007;46(2):492–501. [doi:10.1021/bi0612824](https://doi.org/10.1021/bi0612824)

79. Subrizi A, Tuominen E, Bunker A, Róg T, Antopolsky M, et al. Tat(48-60) peptide amino acid sequence is not unique in its cell penetrating properties and cell-surface glycosaminoglycans inhibit its cellular uptake. *Journal of Controlled Release*. 2012;158(2):277–285. <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2011.11.007>

80. Wallbrecher R, Ackels T, Olea RA, Klein MJ, Caillon L, et al. Membrane permeation of arginine-rich cell-penetrating peptides independent of transmembrane potential as a function of lipid composition and membrane fluidity. *Journal of Controlled Release*. 2017;256:68–78. <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2017.04.013>

81. Szabó I, Mező G, Yousef MA, Soltész D, Bató C, et al. Redesigning of cell-penetrating peptides to improve their efficacy as a drug delivery system. *Pharmaceutics*. 2022;14(5):907. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics14050907>

82. Jiao C-Y, Delaroche D, Burlina F, Alves ID, Chassaing G, et al. Translocation and endocytosis for cell-penetrating peptide internalization. *Journal Biological Chemistry*. 2009;284(49):33957–33965. <https://doi.org/10.1074/jbc.M109.056309>

83. Li L, Vorobyov I, Allen TW. The different interactions of lysine and arginine side chains with lipid membranes. *The Journal of Physical Chemistry B*. 2013;117(40):11906–11920. <https://doi.org/10.1021/jp405418y>
84. Pirhaghi M, Mamashli F, Moosavi-Movahedi F, Arghavani P, Amiri A, *et al.* Cell-penetrating peptides: Promising therapeutics and drug-delivery systems for neurodegenerative diseases. *Molecular Pharmaceutics*. 2024;21(5):2097–2117. <https://doi.org/10.1021/acs.molpharmaceut.3c01167>
85. Zakany F, Mándity IM, Varga Z, Panyi G, Nagy P, *et al.* Effect of the lipid landscape on the efficacy of cell-penetrating peptides. *Cells*. 2023;12(13):1700. <https://doi.org/10.3390/cells12131700>
86. Byrne J, Huang H-W, McRae JC, Babae S, Soltani A, *et al.* Devices for drug delivery in the gastrointestinal tract: A review of systems physically interacting with the mucosa for enhanced delivery. *Advanced Drug Delivery Reviews*. 2021;177:113940. <https://doi.org/10.1016/j.addr.2021.113926>
87. Homayun B, Lin X, Choi H-J. Challenges and recent progress in oral drug delivery systems for biopharmaceuticals. *Pharmaceutics*. 2019;11(3):129. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics11030129>
88. Vazquez-Urbe R, Hedin KA, Licht TR, Nieuwdorp M, Sommer MOA. Advanced microbiome therapeutics as a novel modality for oral delivery of peptides to manage metabolic diseases. *Trends in Endocrinology and Metabolism*. 2024;35(9):779–791. <https://doi.org/10.1016/j.tem.2024.04.021>
89. Hedin KA, Rees VM, Zhang H, Kruse V, Vazquez-Urbe R, *et al.* Effects of broad-spectrum antibiotics on the colonisation of probiotic yeast *Saccharomyces boulardii* in the murine gastrointestinal tract. *Scientific Reports*. 2022;12(1):8862. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-12806-0>
90. Vaaben TH, Vazquez-Urbe R, Sommer MOA. Characterization of eight bacterial biosensors for microbial diagnostic and therapeutic applications. *ACS Synthetic Biology*. 2022;11(12):4184–4193. <https://doi.org/10.1021/acssynbio.2c00491>
91. Redden H, Morse N, Alper HS. The synthetic biology toolbox for tuning gene expression in yeast. *FEMS Yeast Research*. 2015;15(1):1–10. <https://doi.org/10.1111/1567-1364.12188>
92. Sands C, Hedin KA, Vazquez-Urbe R, Sommer MOA. *Saccharomyces boulardii* promoters for control of gene expression *in vivo*. *Microbial Cell Factories*. 2024;23(1):16. <https://doi.org/10.1186/s12934-023-02288-8>
93. Armetta J, Schantz-Klausen M, Shepelin D, Vazquez-Urbe R, Bahl MI. *Escherichia coli* promoters with consistent expression throughout the murine gut. *ACS Synthetic Biology*. 2021;10(12):3359–3367. <https://doi.org/10.1021/acssynbio.1c00325>
94. Durmusoglu D, Naldi M, Parolin C, Erdoğan Ü, Bartolini M, *et al.* Improving therapeutic protein secretion in the probiotic yeast *Saccharomyces boulardii* using a multifactorial engineering approach. *Microbial Cell Factories*. 2023;22(1):45. <https://doi.org/10.1186/s12934-023-02053-x>
95. Santos-Navarro FN, Vignoni A, Boada Y, Pico J. RBS and promoter strengths determine the cell-growth-dependent protein mass fractions and their optimal synthesis rates. *ACS Synthetic Biology*. 2021;10(12):3297–3308. <https://doi.org/10.1021/acssynbio.1c00131>
96. Oesterle S, Gerngross D, Schmitt S, Roberts TM, Panke S. Efficient engineering of chromosomal ribosome binding site libraries in mismatch repair proficient *Escherichia coli*. *Scientific Reports*. 2017;7(1):123. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-12395-3>
97. Felippes de FF, Mchale M, Doran RL, Roden S, Eamens AL, *et al.* The key role of terminators on the expression and posttranscriptional gene silencing of transgenes. *The Plant Journal*. 2020;104(1):96–112. <https://doi.org/10.1111/tpj.14907>
98. Bose A, Wong TW, Singh N. Formulation development and optimization of sustained release matrix tablet of Itopride HCl by response surface methodology and its evaluation of release kinetics. *Saudi Pharmaceutical Journal*. 2013;21(2):201–213. <https://doi.org/10.1016/j.jsps.2012.03.006>
99. Reddy N, Reddy R, Jiang Q. Crosslinking biopolymers for biomedical applications. *Trends in Biotechnology*. 2015;33(6):362–369. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2015.03.008>
100. Jiang G, Woo BH, Kang F, Singh J, Deluca PP. Assessment of protein release kinetics, stability and protein polymer interaction of lysozyme encapsulated poly(D,L-lactide-co-glycolide) microspheres. *Journal of Controlled Release*. 2002;79(1–3):137–145. [https://doi.org/10.1016/S0168-3659\(01\)00533-8](https://doi.org/10.1016/S0168-3659(01)00533-8)
101. Charbonneau MR, Isabella VM, Li N, Kurtz CB. Developing a new class of engineered live bacterial therapeutics to treat human diseases. *Nature Communications*. 2020;11(1):1738. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-15508-1>
102. Brennan AM. Development of synthetic biotics as treatment for human diseases. *Synthetic Biology*. 2022;7(1):ysac014. <https://doi.org/10.1093/synbio/ysac001>
103. Ozdemir T, Fedorec AJH, Barnes CP, Danino T. Synthetic biology and engineered live biotherapeutics: Toward increasing system complexity. *Cell Systems*. 2018;7(1):5–16. <https://doi.org/10.1016/j.cels.2018.06.008>
104. Heavey MK, Durmusoglu D, Crook N, Anselmo AC. Discovery and delivery strategies for engineered live biotherapeutic products. *Trends Biotechnol*. 2022;40(3):354–369. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2021.08.002>
105. Rutter JW, Dekker L, Owen KA, Barnes CP. Microbiome engineering: Engineered live biotherapeutic products for treating human disease. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. 2022;10:892087. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2022.1000873>

106. Chien T, Harimoto T, Kepecs B, Gray K, Coker C, *et al.* Enhancing the tropism of bacteria via genetically programmed biosensors. *Nature Biomedical Engineering*. 2022;6(9):1052–1063. <https://doi.org/10.1038/s41551-021-00772-3>
107. Armstrong A, Isalan M. Engineering bacterial theranostics: From logic gates to *in vivo* applications. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. 2022;10:892087. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2024.1437301>
108. Hedin KA, Kruse V, Vazquez-Urbe R, Sommer MOA. Biocontainment strategies for *in vivo* applications of *Saccharomyces boulardii*. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. 2023;11:1136095. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2023.1136095>
109. Ma Y, Manna A, Moon TS. Advances in engineering genetic circuits for microbial biocontainment. *Current Opinion in Systems Biology*. 2021;36:100483. <https://doi.org/10.1016/j.coisb.2023.100483>
110. Arnold JA, Glazier J, Mimeo M. Genetic engineering of resident bacteria in the gut microbiome. *Journal of Bacteriol.* 2023;205(7):e0012723. <https://doi.org/10.1128/jb.00127-23>
111. Hayashi N, Lai Y, Fuerte-Stone J, Mimeo M, Lu TK. Cas9-assisted biological containment of a genetically engineered human commensal bacterium and genetic elements. *Nature Communications*. 2024;15(1):2096. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-45893-w>
112. Xing H, Liu X, Wang JU, Zhou T, Jin X, *et al.* Magnetically targeted delivery of probiotics for controlled residence and accumulation in the intestine. *Nanoscale*. 2025;17(15):8588–8598. <https://doi.org/10.1039/d4nr04753b>
113. Charbonneau MR, Denney WS, Horvath NG, Cantarella P, Castillo MJ, *et al.* Development of a mechanistic model to predict synthetic biotic activity in healthy volunteers and patients with phenylketonuria. *Communications Biology*. 2021;4(1):89. <https://doi.org/10.1038/s42003-021-02183-1>
114. Cone RA. Barrier properties of mucus. *Advanced Drug Delivery Reviews*. 2009;61(2):75–85. <https://doi.org/10.1016/j.addr.2008.09.008>
115. Chen M-C, Sonaje K, Chen K-J, Sung H-W. A review of the prospects for polymeric nanoparticle platforms in oral insulin delivery. *Biomaterials*. 2011;32(36):9826–9838. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2011.08.087>
116. Zizzari AT, Pliatsika D, Gall FM, Fischer T, Riedl R. New perspectives in oral peptidomimetic delivery. *Drug Discovery Today*. 2021;26(4):1097–1105. <https://doi.org/10.1016/j.drudis.2021.01.020>

Дополнительная информация об авторах / Additional information about the authors

Мерзлякова Наталия Вадимовна / Natalia V. Merzlyakova ORCID 0000-0003-2728-4501; eLIBRARY SPIN 1518-4871
Тихонов Сергей Леонидович / Sergey L. Tikhonov ORCID 0000-0003-4863-9834; eLIBRARY SPIN 4649-8616
Тихонова Наталья Валерьевна / Natalia V. Tikhonova ORCID 0000-0001-5841-1791; eLIBRARY SPIN 1303-8180
Тимофеева Мария Сергеевна / Maria S. Timofeeva ORCID 0000-0001-7760-1427
Семин Александр Николаевич / Alexander N. Semin ORCID 0000-0001-8270-2257; eLIBRARY SPIN 6417-0513
Курдюмов Александр Васильевич / Alexander V. Kurdyumov ORCID 0000-0002-2523-7595; eLIBRARY SPIN 9736-5702
Лылов Антон Сергеевич / Anton S. Lylov ORCID 0000-0002-8068-753X; eLIBRARY SPIN 1491-0150

<https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-2-2646>
<https://elibrary.ru/UIAHNW>

Review article
Available online at <https://fptt.ru/en>

Study of the Structure, Production Methods, and Application of Fucoidan



Danil I. Malkov¹, Stanislav A. Sukhikh^{1,*},
Egor V. Kashirskikh¹, Ksenia A. Balashova¹, Noora Barzkar²

¹ Immanuel Kant Baltic Federal University^{ROR}, Kaliningrad, Russia

² Borneo Marine Research Institute, University Malaysia Sabah^{ROR}, Kota Kinabalu, Malaysia

Received: 24.02.2026

Revised: 26.05.2026

Accepted: 02.06.2026

*e-mail: stas-asp@mail.ru

© D.I. Malkov, S.A. Sukhikh, E.V. Kashirskikh, K.A. Balashova,
N. Barzkar, 2026



Abstract.

Functional foods provide nutrients, but their therapeutic properties are even more important than their nutritional and energy value. The biological diversity of marine flora and fauna makes them a unique source of beneficial chemical compounds. It covered scientific literature on fucoidan extraction, purification, structure, bioactive profile, and applications published in ScienceDirect (Scopus), Springer Link, MDPI and Google Scholar in 1999–2023.

Fucoidan varies in monosaccharide composition, degree of sulfation, and molecular weight. Microwave extraction provides the highest yield. The biological properties depend on molecular weight, sulfation, and monosaccharide composition. Fucoidan is a safe and promising ingredient for the functional food industry. However, very few publications report fucoidan-based commercial products or results clinical trials.

As a bioactive polysaccharide, fucoidan holds significant promise for the food industry. However, its use is limited by the lack of standardized extraction and purification methods. Therefore, optimizing production parameters and developing standardized purification protocols are the key attention areas within modern biotechnology. Novel approaches will enable fucoidan to become a fully-fledged functional ingredient and expand the range of functional foods.

Keywords. Marine algae, polysaccharides, antioxidant activity, anticoagulant activity, antibacterial properties, anticancer properties

For citation: Malkov DI, Sukhikh SA, Kashirskikh EV, Balashova KA, Barzkar N. Study of the Structure, Production Methods, and Application of Fucoidan. Food Processing: Techniques and Technology. 2026;56(2):401–421. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-2-2646>

Структура, получение и применение фукоидана



Д. И. Мальков^{1,*}, С. А. Сухих^{1,*}, Е. В. Каширских¹,
К. А. Балашова¹, Н. Барзкар²

¹ Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград, Россия

² Институт морских исследований Борнео, Университет Малайзии Сабах, Кота-Кинабалу, Малайзия

Поступила в редакцию: 24.02.2026

Принята после рецензирования: 26.05.2026

Принята к публикации: 02.06.2026

© Д. И. Мальков, С. А. Сухих, Е. В. Каширских, К. А. Балашова,

Н. Барзкар, 2026

*e-mail: stas-asp@mail.ru



Аннотация.

Функциональные продукты обеспечивают организм человека питательными веществами и, помимо питательной и энергетической ценности, обладают терапевтическими свойствами. Морская флора и фауна представляют собой огромное биологическое разнообразие и выступают уникальным источником химических соединений. Цель исследования – оценить структуру, методы экстракции, выделения, очистки и возможности применения фукоидана, полученного из морских водорослей. Объектами исследования являлись научные публикации, посвященные методам экстракции и очистки фукоидана, изучению его структуры и биологических свойств, а также возможности практического применения. Поиск научной литературы проводился за период 1999–2023 гг. с использованием международных баз данных ScienceDirect (Scopus), Springer Link, MDPI и Google Scholar. При подготовке рукописи проводили отбор публикаций и критический анализ сведений. В работе систематизированы современные данные о структуре фукоидана, характеризующейся вариативным моносахаридным составом, степенью сульфатирования и молекулярной массой. Представлен критический анализ методов экстракции. Установлено, что наибольший выход полисахарида обеспечивает микроволновая экстракция. Детально рассмотрены биологические свойства фукоидана и показана их зависимость от молекулярной массы, степени сульфатирования и моносахаридного состава. Подчеркнуты безопасность и перспективы применения фукоидана в пищевой промышленности. Отмечено ограниченное количество разработок и коммерческих продуктов на его основе, а также отсутствие клинических испытаний. Фукоидан представляет собой перспективный для пищевой промышленности биологически активный полисахарид, однако его применение сдерживается недостатком стандартизированных методов экстракции и очистки. В связи с этим приоритетным направлением современной биотехнологии является поиск стратегии оптимизации параметров получения и разработка стандартизированных протоколов очистки. Применение современных подходов позволит сделать фукоидан полноценным пищевым ингредиентом и расширить ассортимент функциональных продуктов питания.

Ключевые слова. Морские водоросли, полисахариды, антиоксидантная активность, антикоагулянтная активность, антибактериальные свойства, противоопухолевые свойства

Для цитирования: Мальков Д. И., Сухих С. А., Каширских Е. В., Балашова К. А., Барзкар Н. Структура, получение и применение фукоидана. 2026. Т. 56. № 2. С. 401–421. (На англ.) <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-2-2646>

Introduction

Eating habits are directly linked to health. Consuming foods that are low in nutrients can weaken the immune system and lead to various health problems while regular nutritional support prevents many diseases [1]. Functional foods provide human body with nutrients [2]. Functional foods are products that, in addition to their nutritional and energy value, possess therapeutic properties. Additional benefits of such products include their safety, affordability, and therapeutic synergy, as well as greater tolerability than in standard medications. The capacity of functional foods to mitigate the risk of chronic diseases is primarily driven by bioactive secondary metabolites of plant or animal origin. Such metabolites exhibit a wide range of biological properties [2, 3].

Marine flora and fauna represent a vast biological diversity. This diversity is a unique source of chemical compounds that are used in the food and agrochemical industries. Green, red, and brown algae produce different metabolites with a wide range of metabolic activity [4].

Most species of brown algae inhabit the littoral and sublittoral zones at depths ranging from 5 to 15 m. They are crucial to marine ecosystems because algae beds serve as natural buffers against waves, providing additional substrate for fish eggs and shelter for marine inhabitants. Algae farms perform the same function. Also, algae are one of the main producers of the world's oxygen [5].

The supply of nutrients to algal thalli is provided by water movement. Its intensity affects the biological state of algae, including such economically important

indicators as growth rate, biomass production, reproductive potential, etc. Gaining insight into aquatic environments reveals the natural growth patterns of algae, paving the way for the sustainable use of their resources [6].

Brown seaweeds, such as *Saccharina latissima*, *S. hyperborea*, *Fucus evanescens*, etc., are popular ingredients in the pharmaceutical industry and dietary supplements in nutrition. The reliable therapeutic effects of algal phytochemicals manifest *in vivo* and *in vitro*, rendering them with anticancer, anti-inflammatory, antibacterial, and antiviral activities [4–6].

Recent advances in biopharmaceuticals prompt the investigation of therapeutic agents derived from marine seaweed polysaccharides, particularly sulfated polysaccharides. For instance, fucoidan is currently in the focus of scientific attention. Structurally, fucoidan is a polysaccharide containing L-fucose and phosphate-ester groups found in macroalgal biomass [7]. Fucoidan may possess antioxidant, antitumor, immunomodulatory, and anticoagulant activities [8]. However, scientific and technical literature on its structure, isolation, and therapeutic properties is scattered. Its systematization may provide an insight into the potential applications of fucoidan in the food industry. This review systematizes available data on the structure, sources, extraction methods, and therapeutic profile of this polysaccharide, aiming at highlighting the benefits of its application in nutrition.

The review covers the main sources of fucoidan and their botanical descriptions, as well as methods of fucoidan extraction, purification, and structural modification. It focuses on advanced approaches to studying the structure, extraction, purification, modification, and production of fucoidan. Furthermore, the paper synthesizes recent advancements and promising trends regarding the antioxidant, anticoagulant, antibacterial, antiviral, and anticancer properties of this bioactive compound.

Study objects and methods

The review includes scientific publications on the methods of fucoidan extraction and purification, as well as its structure, bioactive profile, and application prospects. The English-language publications were retrieved from ScienceDirect (Scopus), Springer Link, MDPI, and Google Scholar using the following keywords and phrases: Marine algae, polysaccharides, antioxidant activity, anticoagulant activity, antibacterial properties, anticancer properties. The final pool included research articles or reviews published between 1999 and 2023 that contained descriptions of the main fucoidan sources, preparation methods, structural diversity, and sulfation degree, as well as the bioactivity of its macromolecules and their prospects for functional foods and pharmacy.

Research results and discussion

Structure. Fucoidan is a sulfated polysaccharide. Its composition varies depending on the source. Sulfated L-fucose is the most common fucoidan monosaccha-

ride. Others include galactose, mannose, xylose, glucose, and glucuronic acid [9].

Fucoidan is structurally a branched, heterogeneous molecule. Its heterogeneity is due to its monosaccharide composition, the length of the polysaccharide chain, and the presence of sulfate groups. The branching of the molecule, its sulfation degree (the presence of sulfated groups), and molecular weight depend on the raw material and extraction method. As a rule, fucoidan isolated from macroalgae, e.g., *Ascophyllum nodosum*, consists of α -(1→3)-L-fucose residues or alternating α -(1→3) and α -(1→4) linked L-fucose residues as the main chain with a sulfate group at the C-2 position of α -(1→3)-linked and α -(1→4)-linked L-fucose residues [7–9].

Fucoidans and polysaccharides differ in their composition and structure depending on the source (Table 1). For example, fucoidan extracted from *Fucus evanescens* and *F. serratus* has a higher content of linked L-fucose residues at α -(1→3) and α -(1→4). Fucoidan extracted from *Sargassum stenophyllum* includes residues of β -(1→6)-D-galactose and β -(1→2)-D-mannose, suggesting that sulfated galactose may serve as an alternative structural basis for fucoidan [7–9]. However, none of these publications provided any information on the quantitative content of fucoidan, which will be estimated later in this review.

The structure of fucoidan correlates with its biological activity. X. Zhang *et al.* [10] studied the anticoagulant properties of fucoidan obtained from nine species of brown algae. The samples demonstrated 2-O- α -D-glucuronic pyranosyl branches in the linear (1→3)-linked poly- α -fucopyranoside chain (eight out of nine species). This structural feature is probably responsible for anticoagulant activity. Conversely, antithrombin activity was observed only in fucoidan obtained from five of these eight species [11]. Thus, studies on the structure of fucoidan provide a deeper understanding of the correlation between its structure and beneficial functions.

The structural composition of native fucoidan obtained from brown seaweed is heterogeneous due to the presence of fucose and other monosaccharides, as well as sulfate groups located at different points [27]. Nuclear magnetic resonance spectroscopy provides limited information on the structure of these compounds. Mass spectrometry is a key method for structural analysis of fucoidan [11, 28–31]. Therefore, deciphering the structure of different forms of fucoidan is an important task for determining its biological activity [32, 33].

The monosaccharide composition and structure of fucoidan depend on the age of the algae. For instance, fucoidan isolated from young seaweed harvested in the Sea of Japan (Russia) contained up to 19–28 mol% mannose and approximately 20 mol% galactose while more mature algae yielded fucoidan dominated by fucose and galactose. The galactose content was 38 mol% [34].

Sources, botanical description, ecology, and content. Marine algae are an important source of bioactive com-

Table 1. Structure of different algal polysaccharides

Таблица 1. Структура полисахаридов, получаемых из разных видов водорослей

Source	Type	Monosaccharides / disaccharide units	Glycosidic bonds	Reference
<i>Chorda filum</i>	S-fucopyranose	Fuc, Glu	Poly- α -(1 $\rightarrow$ 3)-fucopyranose, α -(1 $\rightarrow$ 2)-linked single units; sulfated at O-4 (mainly) and O-2 positions	[12]
<i>Fucus serratus</i>	S-fucopyranose	Fuc	A backbone composed of alternating α -(1 $\rightarrow$ 3)- and α -(1 $\rightarrow$ 4)-linked L-fucopyranose residues	[13, 14]
<i>Ascophyllum nodosum</i>	S-fucanes; HMB-cPS; S-laminaran or otherwise modified	Fuc, Xyl, Gal, GlcA, Glc	Alternating α -(1 $\rightarrow$ 3)- and α -(1 $\rightarrow$ 4)-linked L-fucosyl residues; β -(1 $\rightarrow$ 3)- and β -(1 $\rightarrow$ 6)-linked glucosyl residues	[15, 16]
<i>Fucus vesiculosus</i>	S-fucanes	Fuc, Xyl, Gal, GlcA	Alternating α -(1 $\rightarrow$ 3)- and α -(1 $\rightarrow$ 4)-linked L-fucosyl residues	[17]
<i>Fucus evanescens</i>	S-fucopyranose	Fuc, Gal, Xyl	α -(1 $\rightarrow$ 3) and α -(1 $\rightarrow$ 4) glycosidic bonds	[18]
<i>Sargassum cichorioides</i>	L-fucose	Gal	α -(1 $\rightarrow$ 3)-linked L-fucosyl residues	[19]
<i>Sargassum muclurei</i>	L-fucose	Gal	α -(1 $\rightarrow$ 3)-L-fucosyls and α -(1 $\rightarrow$ 4) linked galactosyl residues	[20]
<i>Turbinaria ornata</i>	L-fucose / galactose	Fuc, Gal	α -(1 $\rightarrow$ 3)-L-fucosyls or of β -(1 $\rightarrow$ 4) galactosyls and mixed fucosyl-galactosyls	[21]
<i>Turbinaria conoides</i>	SPS	–	–	[22]
<i>Cladosiphon okamuranus</i>	S-fucanes	Fuc, Glc, GlcA	α -(1 $\rightarrow$ 3)-linked L-fucosyl residues	[23, 24]
<i>Undaria pinnatifida</i>	S-galactofucanes fucoidan	Gal, Fuc, Xyl, uronic acid	Alternating α -(1 $\rightarrow$ 3)- and α -(1 $\rightarrow$ 4)-linked L-fucosyl residues	[8, 11]
<i>Sargassum fusiforme</i>	S-fucanes	Fuc, Gal, Man, GlcA	(1 $\rightarrow$ 2)- α -D-man alternating with (1 $\rightarrow$ 4)- β -D-glcA; some (1 $\rightarrow$ 4)- β -D-gal	[16]
<i>Ecklonia cava</i>	S-fucanes	Fuc, Rham, Gal, GlcA	α -(1 $\rightarrow$ 3)-, α -(1 $\rightarrow$ 4)-, and α -(1 $\rightarrow$ 6)-linked L-fucosyl residues	[12]
<i>Saccharina japonica</i>	S-galactofucan	Gal, Fuc	Alternating α -(1 $\rightarrow$ 3)- and α -(1 $\rightarrow$ 4)-linked L-fucosyl residues	[6, 12]
<i>Laminaria japonica</i>	S-galactofucan	Gal, Fuc	Alternating α -(1 $\rightarrow$ 3)- and α -(1 $\rightarrow$ 4)-linked L-fucosyl residues	[16, 25]
<i>Cladosiphon novae-caledoniae</i>	S-fucoidan	Fuc	–	[26]

pounds due to their vast biodiversity. Table 2 presents some sources of fucoidan, their habitat conditions, and distribution. Macroalgae grown at 10–15 °C are rich in fucoidan (8.00–24.00% d.w.). Cultivating macroalgae at temperatures other than 10–15 °C leads to a decrease in the content of sulfated polysaccharide. Therefore, the fucan content in macroalgal biomass depends on the season, and its accumulation occurs most actively when the water temperature is 15–17 °C. The practical significance of this finding is that macroalgal biomass can be harvested for sulfated polysaccharide during the season when seawater warms to 10–17 °C.

Seasonality presupposes the ambient temperature at which macroalgae grow. It affects not only the fucoidan yield but also its structure and monosaccharide composition. Thus, macroalgae harvested in the spring contain by 1.6% more sulfates than macroalgal biomass

harvested in the autumn and summer. Fucoidan contains equal amounts of galactose and fucose [21], although the fucose content decreases when the algae are cultivated at higher temperatures [39]. This is due to the degradation of the thallus during the maturation phase at higher temperatures [40]. Similarly, W. Mak *et al.* [39] reported the fucan content to drop to 5.95% solids by October. The highest fucoidan content was observed in September (13.79% solids). A similar trend was observed in the sulfate content of fucoidan. The fucose content decreased significantly between July and September [39]. Findings are consistent with the empirical data reported by H. R. Fletcher *et al.* [21] and M. Honya *et al.* [40], who showed that the molar ratio of sulfates increased as the algae matured.

Despite the wide variety of marine sources of fucoidan, many remain unexplored [13–16]. *Laminaria*

Table 2. Fucoidan: Sources, habitat conditions, and distribution

Таблица 2. Водоросли – источники фукоидана и их среда обитания

Source	Habitat conditions	Optimal temperature, °C	Content in dry biomass, %	Reference
<i>Fucus vesiculosus</i>	White Sea; Baltic Sea; Barents Sea	10–17	12.00	[13]
<i>Fucus evanescens</i>	Littoral and sublittoral zones	10	8.00	[14]
<i>Fucus serratus</i>	North Atlantic Ocean	10–20	–	[14]
<i>Ascophyllum nodosum</i>	North Atlantic Ocean	5	1.75	[15]
<i>Pelvetia canaliculata</i>	Atlantic coastline of Europe	17	14.00	[35]
<i>Cladosiphon okamuranus</i>	Okinawa, Japan	18–25	2.30	[23]
<i>Sargassum fusiforme</i>	East Asia	25	6.00	[19]
<i>Saccharina latissima</i>	East Asia; France and Russia (cultivated)	15	16.00	[35]
<i>Sargassum horneri</i>	Coast of Japan and Korea	10–15	24.00	[20]
<i>Nemacystus decipiens</i>	Okinawa, Japan	–	12.10	[36]
<i>Padina gymnospora</i>	Atlantic Ocean	–	–	[37]
<i>Saccharina hyperborea</i>	Sublittoral zones; northern part of the Atlantic Ocean	5–10	–	[38]
<i>Fucus serratus</i>	Northern parts of the Atlantic and Pacific Oceans; the Arctic	10–15	13.60	[14]

japonica, *Fucus vesiculosus*, and *Sargassum horneri* are currently the most promising raw materials with the highest content of fucoidan.

Demand. Fucoidan production is a rapidly developing industry segment that has the potential to influence the global industry. Most algal polysaccharides are used in the food and medical industries. The technological processes for obtaining these polysaccharides are subject to strict control and regulation [41]. The Asian region remains the global leader in fucoidan consumption; in 2017, its regional market intake reached 675 kg, with China and Japan at the forefront of this demand. In 2017, 38.54% of all fucoidan in Asia was consumed in China. The United States is also a major consumer of fucoidan, with a consumption rate of 5,248 kg (36.32%) of global consumption. According to the share of the global market (sales and revenue) of key fucoidan companies, the fucoidan market will grow at an average annual rate of 3.8% in terms of revenue over the next five years. It reached \$37 million USD in 2024, compared to \$30 million USD in 2019. In recent decades, sulfated fucoidan has attracted great attention from the pharmaceutical and biochemical industries. Fucoidan, alginate, and fucans are used for their anti-inflammatory, anticoagulant, antitumor, and antiviral properties. Their processing costs are reasonable due to easy access to these polysaccharides [42]. The economic value of seaweeds and their derivatives is estimated at approximately \$7.4 billion USD [43].

Most companies specializing in fucoidan-based commercial products are located in Asia (Fig. 1, 2). They mostly use *Saccharina japonica* as a source of fucoidan.

On the other hand, fucoidan has no medicinal status in Russia or any other country. Despite its extensive range of biological activity, fucoidan has not been approved by the Food and Drug Administration for clinical use [44]. Fucoidan is not the main commercial product obtained from brown seaweed [45], which is one of the factors limiting its production. The mismatch between structural and biological properties, which depend on the species of seaweed, harvest period, and extraction method, is another factor limiting the commercial use of fucoidan. Differences in chemical properties, extraction methods, purification, and production of various forms of fucoidan indicate that fucoidan as a medicinal product does not meet the Good Manufacturing Practice standards established for pharmaceutical products by the World Health Organization (2014). This failure of fucoidan to comply is due to its contamination by other biological polymers and phenols, low bioavailability, and a wide variety of chemical structures.

While fucoidan is still in the process of being approved for clinical use, it has been approved as a safe food product. Several patents feature fucoidans for biomedical purposes. One patent covers the use of fucoidan as a framework for tissue regeneration [45] while another describes the formulation and use of a fucoidan-based product for the treatment of blood-clotting disorders [46]. However, obtaining a patent for a product only protects the inventor's rights and does not give permission for commercial production.

Impurities significantly affect the bioactivity of fucoidans. In accordance with the requirement for clinical use, raw fucoidan must be purified to evaluate its struc-

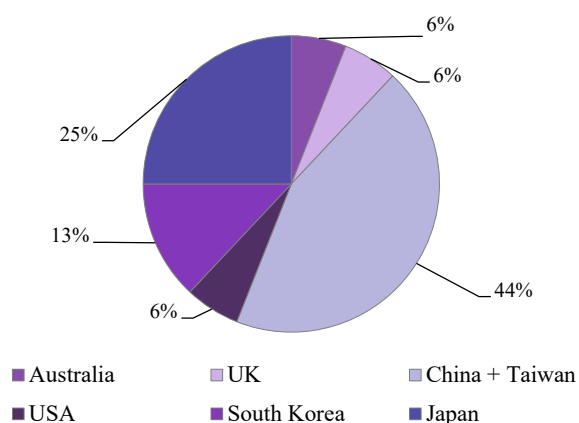


Figure 1. Companies producing fucoidan-based commercial products

Рисунок 1. Компании, производящие коммерческие продукты на основе фукоидана

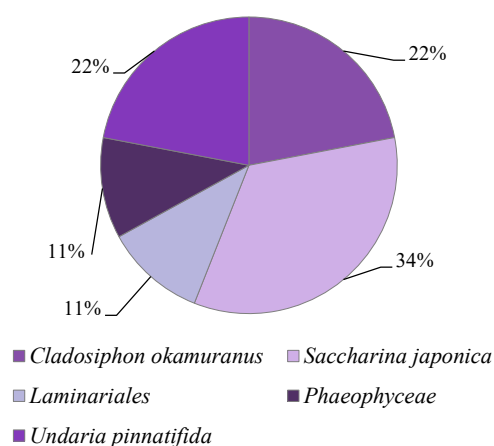


Figure 2. Fucoidan sources in commercial products

Рисунок 2. Источники фукоидана в коммерческих продуктах

ture and bioactivity in its pure form. Purification methods for fucoidans, such as ion exchange chromatography [47], gel permeation chromatography, and biological affinity purification, significantly increase the cost of producing pure fucoidans. The symbiotic relationship between marine algae and marine microbiota is also important. Algal cell walls are typically host to several deeply attached bacterial species [48].

Fucoidan is of great interest as a potential drug candidate due to its anticoagulant, antiviral, and antitumor activities. Several challenges, however, hinder fucoidan from meeting Good Manufacturing Practice regulations, thereby blocking its endorsement by the Food and Drug Administration. These challenges include structural heterogeneity, co-extracted contaminants, and ecology-related issues. Therefore, commercial fucoidan production needs new methods and optimal conditions, which would yield a stable polysaccharide with desirable physico-

Table 3. Stages of extraction and purification of polysaccharides

Таблица 3. Стадии экстракции и очистки полисахаридов

Stage	Methods
Harvesting seaweed	Manual method
Preliminary processing	Enzymatic treatment; drying; washing; chemical treatment; grinding
Polysaccharide extraction	Microwave extraction; ultrasonic extraction; acid extraction; hot water extraction; enzymatic extraction
Fucoidan extraction and purification	Fractional precipitation; ion exchange chromatography; membrane filtration; gel chromatography
Establishing fucoidan structure	High-performance liquid chromatography (HPLC); spectrophotometry; nuclear magnetic resonance (NMR); mass spectrometry

chemical and therapeutic properties. This review, which provides a synthesis of scientific and technical literature, may enable researchers to optimize the parameters and methods for fucoidan extraction and purification.

Extraction and purification. This review revealed no universal technology capable of producing a heterogeneous polysaccharide from macroalgae. Table 3 presents a theoretical analysis of existing extraction and purification methods. The contemporary phycology involves time-consuming processes that require significant material resources. Their multi-stage nature leads to severe losses of the finished product.

The production of algal fucoidan consists of the following main stages: harvesting of raw materials from the sea; washing them to remove impurities (epiphytes, sand) and excess salts; mechanical (grinding) or chemical (depigmentation) pretreatment; extraction of fucoidan; concentration of polysaccharide extract; purification of the target product (separation methods, chromatography); drying; intermediate storage.

The stages of depigmentation and adsorption of accompanying substances are especially important. Depigmentation involves treating the ground plant material with acetone, methanol, chloroform, ethyl alcohol, or its solution. It removes fat-soluble pigments and lipids [38, 49]. Treating plant-based raw materials (algal biomass) with activated carbon removes aromatic compounds, polyphenolic compounds, and chlorophyll [49]. Other polysaccharides (starch, cellulose, alginate, etc.), which differ structurally from fucoidan, leave the biomass at other processing stages [49–50]. For this purpose, the extract is further treated with acetone and sodium carbonate. As a result, sodium alginate precipitates and can be separated by centrifugation. In addition, the extract is treated with enzyme preparations (amylase, cellulase) to break down starch and cellulose. It is also treated with proteinase K, trypsin, or protease to break down glycopeptides and increase the fucoidan yield [51, 52].

The most common method for isolating fucoidan from macroalgal biomass is thermal extraction with weak acid solutions (hydrochloric acid) and water [14, 53, 54]. Water is heated to 80–90 °C to serve as extractant. Aluminum oxalate or sodium oxalate is then added to the water. These compounds bind the sulfated polysaccharides, resulting in a more efficient extraction [54]. To achieve more complete precipitation of the heterogeneous sulfated polysaccharide, the extraction process is repeated several times. The extracts are then combined and concentrated, after which polysaccharides are precipitated by centrifugation. Table 4 illustrates the methods for extracting fucoidan from macroalgae [20, 21, 55–60].

Microwave extraction yields an extract with the highest fucoidan content (from 16.08 to 18.22% d.w.). The extraction method typically involves adding distilled water to the crushed plant material: 1 g of algae is added to 25 ml of distilled water. The resulting mix is microwaved for 1 min at 120 psi [55–57]. This method has several advantages, including high efficiency and minimal processing time. In addition, it requires no organic solvents and enables a sustainable selective production of sulfated polysaccharides. Avoiding high temperatures and organic or inorganic solvents ensures the preservation of the target polysaccharide's structure [25].

Ultrasonic extraction allows for the production of a sulfated polysaccharide with an intact native structure. However, according to A. K. Patel *et al.* [58], the yield of the target product is low (3.51% d.w.). Ultrasonic extraction induces cavitation through dynamic shock waves directed at the material surface. This procedure disrupts the cell walls of the plant material, thus extracting fucoidan. The method utilizes solutions of hydrochloric acid (0.1 N HCl) and sodium hydroxide (0.1 N NaOH) [61]: it takes place at room temperature for at least 6 h in the presence of 0.1 N HCl (pH 2.0), followed by the neutralization of the supernatant with 0.1 N NaOH [25].

Enzymatic fucoidan extraction demonstrates low efficiency. According to S. Badrinathan *et al.* [20], the yield

of the target product is insignificant (6.2% d.w.). Cellulolytic enzymes break down the cell walls of plant materials. Crushed seaweed is mixed with distilled water at a ratio of 1:20 at 25 °C. The resulting suspension is adjusted to pH 6.0 with an HCl solution, and 2% cellulolytic enzymes are added. The mix is then incubated at 40 °C for 2 h, then heated to 80 °C and held at this temperature for 60 min. The resulting solution is centrifuged, dialyzed, treated with ethyl alcohol, and dried [62]. The disadvantage of this method is in its multi-stage nature and low yield, attributed to the loss of the target product at each stage.

Extraction with diluted acids is low-effective due to the poor solubility of sulfated polysaccharide at low pH. One disadvantage of this method is in its high solvent consumption: 1 kg of plant material requires at least 16 L of 0.1 N HCl. Another disadvantage is that fucoidan undergoes denaturation during the extraction process, which affects its biological activity [25, 63]. Dried algae are soaked in 0.1 N HCl and kept at room temperature for 24 h. The extract is then filtered for the filtrate to be neutralized with a 1 N NaOH solution. Fucoidan is precipitated with 75% ethanol in a 3:1 ratio by volume [63].

Although hot water extraction is inexpensive and easy to use, it is labor-intensive and solvent-demanding. This method relies on the solubility of polysaccharides in water and their ability to precipitate in the presence of alcohols and organic solvents. First, seaweed is finely ground and washed with ethyl alcohol at 80 °C for 60 min. Then, it is treated with distilled water at an extract-to-water ratio of 1:60. Water treatment continues for 7 h at 100 °C. Finally, the supernatant is treated again with ethyl alcohol [60].

In addition to the methods in Table 4, autoclave hydrolysis (AH) with an aqueous hydrochloric acid solution can isolate fucoidan from macroalgae [18, 64]. Combined methods maximize fucoidan yield. Authors isolated fucoidan from *A. nodosum* and *S. hyperborea* by sequentially applying a hydrothermal method in the

Table 4. Methods for extracting fucoidan from macroalgae

Таблица 4. Способы извлечения фукоидана из макроводорослей

Specie	Extraction method	Extraction efficiency / yield, % d.w.	Reference
<i>Ascophyllum nodosum</i>	Microwave extraction	16.08	[55]
<i>Fucus vesiculosus</i>	Microwave extraction	18.20	[56]
	Autoclave hydrolysis	16.50	[56]
	Microwave extraction	18.22	[57]
<i>Nizamuddinina zanardinii</i>	Ultrasound extraction	3.51	[58]
<i>Sargassum ilicifolium</i>	Ultrasonic probe treatment; microwave-assisted extraction; hot water extraction	8.00	[59]
		6.00	
<i>Sargassum myriocystum</i>	Enzymatic extraction	6.20	[20]
<i>Undaria pinnatifuta</i>	Hot water extraction	12.90	[60]
<i>Turbinaria decurrens</i>	Treatment with alcohol and organic solvents (chloroform); sequential extraction with CaCl ₂ , HCl	5.58 (crude)	[21]
		1.28 (purified)	

presence of 0.1 N hydrochloric acid, followed by ultrasonic and thermal treatments [64].

Microwave-assisted extraction (MAE) requires either water or a water-ethanol solution as the extractant [51, 52, 65]. These physical extraction methods help to disrupt the algal cells more thoroughly, thereby increasing the yield of the target product into the extractant [64].

Physical extraction methods by ultrasonication, microwaving, or autoclave hydrolysis shorten the extraction process and reduce the negative impact on the environment since they involve no aggressive chemical agents [58, 64]. However, the processing conditions (time, temperature, pressure) have a significant impact on both the final yield and its structure (monosaccharide composition, degree of sulfation, degree of branching), including the length of the polysaccharide chain (molecular weight) and therapeutic properties [64].

Liquid-phase extraction largely depends on such parameters as temperature and pressure. Exposure to elevated temperatures and pressures breaks the bonds formed by van der Waals interactions and hydrogen bonds, which increases fucoidan yield [56].

The method involving sequential treatment with alcohol and organic solvents (chloroform) requires extraction with calcium chloride and a diluted hydrochloric acid solution. It provides a satisfactory yield of the target product [21].

The scientific and technical analysis of fucoidan extraction from macroalgal biomass (Table 4) may enable scientists to optimize the parameters for isolating the target product and increase its yield.

After fucoidan extraction, the resulting extract contains proteins and other polysaccharides, which are subsequently removed through precipitation and enzymatic treatment [49–52]. Fucoidan purification stage is important as it yields a higher-quality, more therapeutical-

ly active product: purified bioactive substances have stronger biological properties than contaminated ones.

The purification process for sulfated polysaccharides should include such stages as fractionation, precipitation, column chromatography (ion-exchange, affinity, and exclusion), and membrane filtration [22, 50, 51]. The fractionation of polysaccharides can be performed either by precipitation (with calcium chloride, ethyl alcohol, or isopropanol) or by column chromatography (ion-exchange chromatography) [51]. Fucoidans with different molecular weights can be separated using membrane separation and gel chromatography [24, 58, 59]. As previously mentioned, algae contain fucoidans with varying molecular weights and degrees of sulfation.

All these methods of fucoidan extraction differ in the number of stages and the equipment used. Currently, no method guarantees fucoidan with a stable structure, sulfation degree, and therapeutic profile. Therefore, further research is needed to screen the technological parameters for extracting a unique polysaccharide from plant-based raw materials, which would yield fucoidan of consistent quality, i.e., with a specific structure, degree of sulfation, and branching. However, our current work may bring researchers closer to this goal.

Bioactivity. Fucoidan is a heterogeneous branched polysaccharide with antioxidant, anticoagulant, anti-inflammatory, immunomodulatory, antimicrobial, and antifungal properties. These effects depend on the extraction method, sulfation, macromolecular branching, and the length of the polysaccharide chain (molecular weight) (Fig. 3) [11, 12, 29, 50, 66–68].

The molecular weight of fucoidan varies widely, from 10,000 to 100,000 Da [11, 12, 50]. Since the bioactivity of the polysaccharide depends on many factors, the results reported in scientific literature also vary. This section synthesizes available information on fucoidan bioactivity

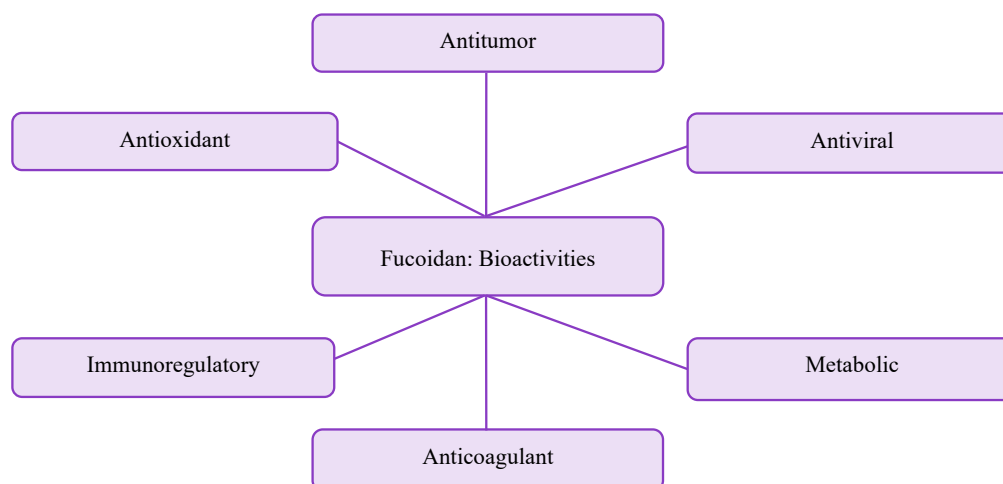


Figure 3. Proapoptotic activity of fucoidan

Рисунок 3. Проапоптотическая активность фукоидана

and the mechanisms underlying its therapeutic profile. Driven by its bioactive properties, fucoidan research is increasingly shifting from fundamental science to practical applications. This nonlinear heterogeneous polysaccharide is a natural, non-toxic substance that rarely causes allergic reactions [29]. Figure 3 presents the main properties of fucoidan in the context of its potential practical applications.

Antioxidant activity. Due to its significant antioxidant activity [7, 13, 31, 69–71], fucoidan is widely recommended by researchers for therapeutic and practical applications. Low-molecular-weight fucoidan is preferable since it possesses stronger antioxidant properties [72–76]. Fucoidan with a short polysaccharide chain binds low-density lipoproteins more readily than native polysaccharide [70]. Lipid concentration depends on the degree of sulfation and the mass fraction of fucose in the polysaccharide [77]. Thus, fucoidans with a high degree of sulfation and a high fucose content possess more pronounced antioxidant properties [7, 9, 77].

While the exact mechanism of fucoidan antioxidant action remains unclear, this polysaccharide is known to be able to neutralise the toxic effects of glutathione, superoxide dismutase, reactive oxygen species, and β -amyloid, as well as reduce their concentrations (Fig. 4) [69–71, 78–82].

All these factors (molecular weight, branching, sulfation, and fucose mass fraction) should be considered synergetically rather than individually as they are directly determined by the source of the fucoidan and the extraction method [75].

Scientific community is still in the early stages of studying the antioxidant properties and mechanisms of action of this unique polysaccharide. To date, science knows no optimal fucoidan extraction and purification method that would facilitate the standardization of its

antioxidant potential. Therefore, further research is needed to improve fucoidan extraction technology and to study the mechanisms of free radical scavenging. The results obtained will expand the range of functional foods that slow down oxidation processes and prevent socially significant diseases associated with the accumulation of reactive oxygen species and free radicals.

Antitumor activity. Various types of fucoidan affect the cell cycle of tumor cells, particularly in the G1 phase. K. Mi-Hyoung *et al.* [83] summarized the inhibitory activity mechanisms of fucoidan obtained from *F. esiculosus* in human colon cancer cells. Fucoidan was able to induce the activation of protein kinase B and cell cycle arrest in the G1 phase by increasing the expression of tumor suppressor p21, decreasing cyclin D1/CDK4 and suppressing the expression of cyclin E/CDK2.

Fucoidan isolated from *F. vesiculosus* inhibited the proliferation of human colon cancer cell line HT-29 by reducing the expression of cyclin D1, cyclin E, CDK2, and CDK4 through the involvement of the PI3K/Akt/mTOR/p70S6K1 pathway *in vitro* by western blotting experiments [84]. Fucoidan obtained from *Undaria pinnatifida* inhibited the cell cycle in the G0/G1 phase of prostate cancer cell line PC-3 [85]. Unpurified fucoidan from *F. vesiculosus* blocked the G1 phase of mouse breast cancer cell line 4T1 by reducing β -catenin levels in the nucleus and cytoplasm, thereby reducing c-Myc and cyclin D1 expression (flow cytometry *in vitro*) [86]. Fucoidan from *Cladosiphon okamuranus* could arrest the G0/G1 phase of Huh7 hepatoma cell line by suppressing CXCL12/CXCR4 expression [83]. Fucoidan also blocks other cell cycle phases. For example, fucoidan with a molecular weight of 40 kDa isolated from *C. okamuranus* exhibited anti-proliferative activity against gastric cancer cell line MKN45 and was able to block the S-phase and DNA replication [87].

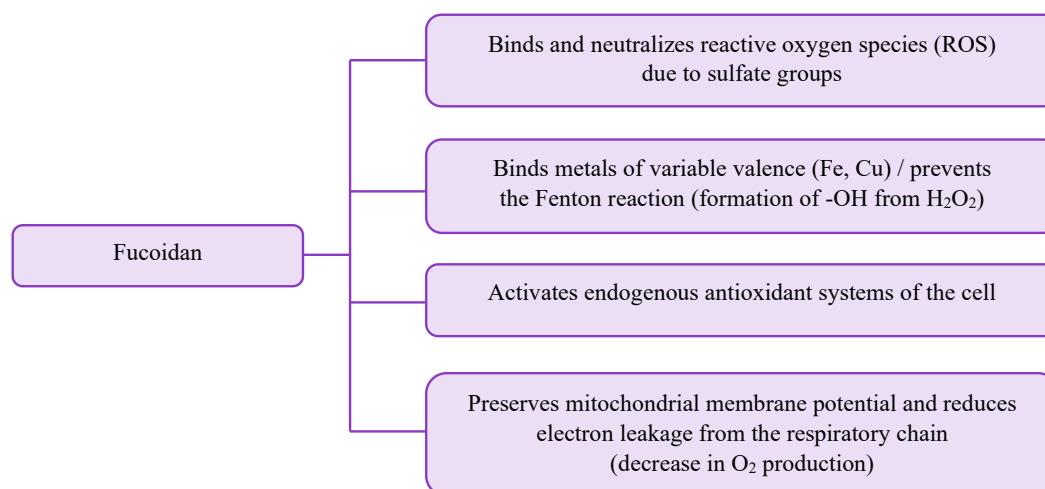


Figure 4. Mechanisms providing fucoidan with antioxidant properties

Рисунок 4. Механизмы, обеспечивающие антиоксидантные свойства фукоидана

Thus, fucoidan obtained from *F. vesiculosus*, *U. pinatifida*, and *C. okamuranus* had inhibitory effects on the cell cycle of various tumor cell lines. Among the species studied, the effect of fucoidan from *F. vesiculosus* was found to be the most significant. Although fucoidan arrests the cell cycle in the S phase, its main effect is manifested in the G1 phase through the reduction of cyclin D1, cyclin E, CDK2, and CDK4. Notably, the activation of p21 is not a necessary condition for this effect.

Apoptosis plays a key role in maintaining the homeostasis of a healthy organism, but it can also participate in pathological processes such as cancer [88]. The morphological changes that occur during apoptosis include membrane swelling, chromatin condensation, cell shrinkage, and phagocytosis of apoptotic bodies [89]. Cell apoptosis can occur via either the receptor-mediated pathway (external pathway) or the mitochondrial pathway (internal pathway). The mitochondria are the central translation station for caspase-dependent apoptosis and caspase-independent apoptosis.

Caspase-dependent apoptosis can be initiated by two pathways: activation of death receptors such as DR5 or Fas [90] on the cell surface, which leads to the activation of initiator caspase-8 [91–92] inside cells. These changes ultimately lead to alterations in mitochondrial processes. In turn, these processes cause cytochrome C to be released from the mitochondria into the cell cytosol. In the cell cytosol, cytochrome C is activated by caspase-9 [83]. As in receptor-mediated and mitochondrial mechanisms of caspase-8 and caspase-9 activation, caspase-3 is also activated and participates in the cleavage of poly(ADP-ribose) polymerase. This process ultimately leads to DNA damage and is a marker of apoptosis [84].

If apoptosis occurs via a receptor-mediated mechanism, the activation of caspase-8 can cleave Bid to tBid to activate the mitochondrial pathway in type II cells, so cross-talk between the intrinsic and extrinsic pathways may be mediated by Bid [85]. Thus, sometimes the extrinsic pathway can stimulate the intrinsic pathway of apoptosis.

Binding death receptors with their ligands can also activate NF- κ B, PI3K/Akt, and MAPK pathways [91]. The PI3K/Akt and MAPK pathways affect each other. Akt phosphorylation is modulated by p38 [93]. The PI3K/Akt pathway regulates apoptosis by activating caspase-9 [86]. The MAPK family, including ERK, JNK, and p38, can lead to NF- κ B activation and cell survival [84–86]. P38 MAPK is mainly associated with apoptosis and differentiation. The ERK1/2 pathway is upstream of GSH and NO or affects the amount of GSH and NO while the JNK pathway depends on the presence of NO in the leukemia cell line HL-60, and GSTs are inhibitors of JNK 74. The MEK1/2-ERK1/2 pathway depends on MEKK1, and ERK1/2 activation affects JNK activity [90, 92].

In addition to mitochondria, the endoplasmic reticulum (ER) also participates in the apoptotic pathway by releasing Ca^{2+} ions into the cytosol. The release of

cytochrome from mitochondria facilitates the release of calcium ions, and Bax and Bak affect this process [88]. The process of Ca^{2+} release and subsequent apoptosis is summarized as follows. GRP78 is released from the translocon and depletes ER Ca^{2+} . Then, Ca^{2+} binding to calmodulin activates CaMKII signaling. Finally, CaMKII and JNK induce Fas expression, and CaMKII enhances cytochrome C release and mitochondrial membrane potential loss [91], suggesting that ER stress may mediate both external and internal pathways. In addition, the ER stress signaling pathway may be associated with two cascades, namely PERK/P-eIF2 α /CHOP and ATF6 (IRE-1)/XBP-1 [92].

Fucoidan is known to affect apoptotic mechanisms. For example, fucoidan obtained from the commercially available product *C. novae-caledoniae* Kylin induced apoptosis through caspase-independent and mitochondrial pathways. This process resulted in decreased expression of apoptosis inhibitors Bcl-2 and Bcl-xl while increasing the expression of apoptotic markers Bax and Bad, releasing cytochrome C and apoptosis-inducing factor (AIF) and activating the ROS-dependent JNK phosphorylation pathway in the human breast cancer cell line MCF-7 [93–95].

Fucoidan from *C. okamuranus* was reported to induce apoptosis by regulating NF- κ B and AP-1 through inhibition of I κ B α and JunD phosphorylation [96, 97].

Fucoidan isolated from *F. vesiculosus* raised caspase-3 levels, inducing apoptosis in human colon cancer HT-29 tissues and melanoma cells [98–100]. Fucoidan from *F. vesiculosus* induced apoptosis in the human colon cancer cell line HCT-15 by suppressing Bcl-2, increasing Bax activity, activating caspase-9 and caspase-3, cleaving PARP, activating ERK and p38, and blocking PI3K/Akt pathways [93].

T. Nakamura *et al.* [84] investigated the mechanism of apoptosis induction in the mouse 4T1 breast cancer cell line by unprocessed fucoidan from *F. vesiculosus*. Bcl-2 expression and ERK phosphorylation were significantly reduced, leading to diminished cell survival.

Unprocessed fucoidan from *F. vesiculosus* induced apoptosis in the 4T1 breast cancer cell line in mice by reducing the level of β -catenin in the nucleus and cytoplasm, subsequently reducing the expression of its targets [96].

Fucoidan from *F. vesiculosus* modulated ER stress, leading to decreased GRP78 expression, CaMKII phosphorylation, and high Bax and caspase-12 in the human breast cancer cell line MDA-MB-231. It also induced pro-apoptotic cascade p-eIF2/CHOP while suppressing the survival cascade p-IRE-1/XBP-1s in the human breast cancer cell line MDA-MB-231 and human colon cancer cell line HCT116 to induce apoptosis [96].

Fucoidan from *F. vesiculosus* induced apoptosis in human leukemia cell line HL-60, acute monocytic leukemia cell line THP-1, and human promyelocytic leukemia cell line NB4 by activating MEKK1, ERK1/2, MEK1, and

JNK. The depletion of glutathione and production of NO resulted in Bid cleavage and activation of caspase-8, -9, and -3 [91].

Isolated and purified fucoidan from *F. vesiculosus* was able to induce apoptosis in the human hepatocellular carcinoma cell line HepG2 through the p38 MAPK pathway [100].

Fucoidan obtained from *U. pinnatifida* induced apoptosis in the human hepatocellular carcinoma cell line SMMC-7721 via the AFK-mediated mitochondrial pathway with decreased GSH, accumulation of AFK, increased Bax/Bcl-2 ratio, and activation of caspase-8, -9, and -3 [101].

Fucoidan from *U. pinnatifida* induced apoptosis in the human prostate cancer cell line PC-3 by activating ERK1/2, inactivating PI3K/Akt and p38 MAPK, and suppressing the Wnt/ β -catenin pathway [101].

Fucoidan from *U. pinnatifida* was reported to induce apoptosis in the human lung cancer cell line A549 by regulating the Bcl-2 family, regulating the MAPK pathway (activating ERK1/2 and suppressing p38), and suppressing the PI3K/Akt pathway [102].

The effects of fucoidan on apoptosis mechanisms are predominantly associated with caspase-dependent apoptosis, the Bcl-2 protein family, the MAPK pathway, the PI3K/Akt pathway, and the Wnt/ β -catenin pathway. The IAP protein family, ER proteins, and the caspase-independent pathway AIF have a lesser impact on AFK. Fucoidan from various sources can induce apoptosis in a variety of cancer cell lines, including breast, colon, leukemia, hepatocellular carcinoma, prostate, lung, bladder, gastric, and myelodysplastic syndrome/acute myeloid leukemia cell lines. The mechanisms of apoptosis induction involve the activation of various signaling pathways and the modulation of specific proteins associated with apoptosis. However, some experiments *in vitro* demonstrated that fucoidan at cytotoxic concentrations did not affect the growth of tumor cell lines or their mitosis [103].

Ferroptosis is closely related to IR-induced hepatocellular damage. Administration of fucoidan or FER-1 inhibited ferroptosis by removing reactive oxygen species while inhibiting lipid oxidation and iron accumulation whereas these effects were reversible after erastin treatment. Iron accumulation, mitochondrial membrane fission, and reactive oxygen species production associated with ferroptosis were reported to inhibit the entry of nuclear factor erythroid 2-related factor 2 (Nrf2), hemoxygenase-1 (HO-1), and glutathione peroxidase 4 (GPX4) into the nucleus, resulting in decreased protein content. Pre-use of fucoidan facilitated adaptive changes and reduced irreversible cell damage induced by IR or erastin [104].

Fucoidan extracted from *F. vesiculosus* possess reliable anti-inflammatory effect. The related studies featured inflammation induced by lipopolysaccharide (LPS), polyinosin:polycytic acid, Pam2CSK4 (Pam), or tumor

necrosis factor alpha (TNF- α). The expression of 65 kDa protein (RPE65) and protein (CD59) was verified by western blotting, quantitative polymerase chain reaction (qPCR) (IL6, IL8, MERTK, PIK3CA), and phagocytic activity by microscopic analysis. Fucoidan FV decreased the secretion of proinflammatory cytokines poly I:C IL-6 and IL-8. In addition, FV-fucoidan treatment was able to eliminate the decrease in CD59 in IL-6 and IL-8 expression by RT-PCR, LPS, and TNF- α in western blotting [105].

To summarize, heterogeneous sulfated polysaccharides hold great promise for cancer therapy and the functional food industry. However, fucoidan-based anticancer drugs and functional foods require stabilized monomeric composition and sulfation supported by preclinical and clinical molecular trials.

Immunoregulatory activity. Fucoidan is an effective immunomodulator, but this property is still under investigation [106]. According to some studies, the immunomodulatory activity of fucoidan is due to its anti-tumor and antiviral activities [107, 108]. These biological properties contribute to the modulation of the immune system at the cellular level [109, 110]. On the other hand, fucoidan may owe its immunomodulatory properties to its ability to bind to toll-like receptors, activate chemokines and cytokines, produce interleukin-2 and interleukin-6, stimulate the production of TNF- α , and activate the expression of CD40, CD80, and CD86. Fucoidan activates the immune system due to its probiotic activity [47, 109, 111, 112].

The extent to which fucoidan exhibits immunoregulatory activity depends on its structural characteristics, particularly on the number of acetyl and sulfate groups [111]. However, opinions differ, revealing a gap in the study of the relationship between the structure of fucoidan and its immunoregulatory activity. This property is an important area of focus for commercial application of fucoidan.

Antiviral activity. Viruses pose a tremendous threat in this era of rapid social development. Antiviral drugs are largely ineffective, making it a crucial challenge to find new effective but non-toxic antiviral substances. Preparations based on plant-derived polysaccharides were reported to shorten the duration of viral infections and alleviate their symptoms [113]. In addition, sulfated polysaccharides were capable of inhibiting such viruses as herpes simplex, viral diarrhea, influenza, cytomegalovirus, enterovirus, norovirus, HIV-1, hepatitis B, etc. [6, 47, 114, 115] while remaining low-toxic [6].

Fucoidan exerts its antiviral activity by binding to glycoproteins on the viral envelope, thereby preventing the virus from attaching to the host cell. It inhibits the process of viral adsorption by cells, inhibits reverse transcriptase activity, and inactivates the transcription process [6, 115–117]. However, this review fails to cover all the numerous, complex, and diverse mechanisms of fucoidan's antiviral activity [118].

The extent of fucoidan antiviral activity depends on its monosaccharide composition, polysaccharide chain length, degree of sulfation, and degree of branching. Of these parameters, the degree of sulfation has the greatest influence on the biological properties of fucoidan [6, 115]. For instance, fucoidan with a high degree of sulfation exhibited the highest antiviral activity [6]. The sulfate group at the C-4 position was reported to enhance antiviral properties (herpes simplex virus type 1) in the presence of a 1-3-linked glycosidic bond in the fuco-pyranosyl moiety [115].

As a natural substance, fucoidan could be a promising ingredient in next-generation functional foods with antiviral properties. However, developing such products requires a better understanding of fucoidan mechanisms of activity. Our literature search revealed a complete absence of clinical trials of fucoidan against human viruses. Such trials are crucial for confirming the future potential of this polysaccharide. Additionally, we detected a certain lack of information on the optimal molecular weight of fucoidan for antiviral activity. The effect of gastric acidity on fucoidan properties and intestinal penetration remains understudied.

Anticoagulant activity. Anticoagulant therapy is the most common form of treatment for the elderly, and anticoagulant drugs themselves are associated with a number of severe side effects [119]. Thus, searching for natural antithrombotic substances is of great therapeutic relevance [120], and fucoidan could be one of them [121]. This heterogeneous polysaccharide inhibits thrombin formation, slows down factor X synthesis, and inactivates fibrin polymerization [122]. However, these results were obtained using model systems, such as blood plasma and purified coagulation factors. Therefore, this direction requires *in vivo* studies of fucoidan's anticoagulant activity. The anticoagulant activity of fucoidan depends on its structure, including chain length, degree of sulfation, position within the chain, monosaccharide composition, and uronic acid content [109, 121, 123–129]. However, our literature review revealed some inconsistencies, which are summarized in Table 5.

Despite these contradictions, low-molecular-weight fucoidans definitely possess anticoagulant activity. For instance, fucoidans with a molecular weight of ≥ 850 kDa demonstrated no anticoagulant activity [124]. However, this observation was made on a limited number of samples, and further research is needed to establish a more

convincing case. Therefore, additional research is required to strengthen the validity of this new knowledge regarding the anticoagulant activity of fucoidan.

Hypothetically, it is not the sulfation degree that affects anticoagulant activity but rather the location of the substituents. For example, H. H. Hsiao *et al.* [128] increased the anticoagulant activity of a natural fucoidan molecule by adding sulfate groups to the fuco-pyranose residues at positions 2 and 3. However, this hypothesis has not yet been confirmed or refuted by other researchers.

While scientific literature provides comprehensive data on the mechanism of fucoidan's anticoagulant activity and its characteristics depending on the molecular structure and composition, the results remain contradicting. Therefore, further scientific research is needed on the effect of molecular weight on anticoagulant activity. We were also unable to find a sufficient number of publications confirming *in vivo* anticoagulant activity with clinical trials. This gap in scientific knowledge remains to be addressed as it may yield a novel anticoagulant drug based on a natural polysaccharide.

Metabolic activity. Metabolic syndrome, also known as Syndrome X, is classified by the World Health Organization as a pathological condition characterized by abdominal obesity, insulin resistance, arterial hypertension, and hyperlipidemia (elevated levels of lipids in the blood). The total economic losses to countries are estimated in trillions as they include healthcare expenditures, loss of productive population, and social support costs [130]. Nutritionists and dietitians recommend incorporating bioactive substances into the diet to treat and prevent this condition. Fucoidan shows great promise in this regard as it alleviates pathological conditions associated with metabolic syndrome, including hyperglycemia, hyperlipidemia, obesity, and hypertension.

In particular, experiments *in vivo* demonstrate that this heterogeneous, non-linear polysaccharide inhibits alpha-glucosidase activity, improves glucose tolerance, and reduces the risk of diabetic retinopathy [38, 131]. For instance, fucoidan was described as a natural bioactive molecule that can prevent and treat non-insulin-dependent diabetes mellitus (type 2) [131–133]. Another benefit of fucoidan is its ability to lower blood pressure. Specifically, experiments on rats with diabetes showed a decrease in blood pressure following fucoidan administration [133].

A few scientific studies suggest that fucoidan may treat diseases associated with lipid metabolism disorder.

Table 5. Inconsistencies regarding the anticoagulant activity of fucoidan

Таблица 5. Расхождения в результатах исследований антикоагулянтной активности фукоидана

Parameter	Supporting data	Inconsistencies	Reference
Molecular weight	Active fractions of 50–100 kDa	Some fucoidans with a molecular weight of ≤ 300 kDa have pronounced anticoagulant activity	[109, 124, 125]
High degree of sulfation	Correlates with activity	Some studies do not confirm this correlation	[109, 128]
Low content of uronic acids	Has a beneficial effect on anticoagulant activity	No systematic studies have been conducted	[109]

ders [130, 132, 134, 135]. It slows down lipogenesis and thereby improves lipolysis, suppresses the expression of adipose tissue, and inhibits the production of angiotensin II in blood plasma [130, 135]. As a result, animals' lipid profiles normalize (hyperlipidemia decreases), and macrophage infiltration decreases in adipose tissue. Simultaneously, the concentration of inflammatory cytokines and body weight go down [136, 137].

Fucoidan was reported as an effective prebiotic that stimulates the growth of normal gut flora and normalizes gastrointestinal motility [109, 132, 138]. As fucoidan is a complex polysaccharide, it can stimulate the growth of microorganisms in the intestine. However, because the specific prebiotic mechanisms of fucoidan remain poorly understood, deeper research in this area is required.

The information presented suggests that fucoidan is a unique natural molecule with combined therapeutic effects on metabolism, which contribute to the management of metabolic syndrome. However, information regarding the positive effects of fucoidan on metabolism is limited. This gap prevents a more precise description of its mechanisms of action. Understanding the mechanisms through which fucoidan improves metabolic processes will allow researchers to develop new drugs for treating conditions such as diabetes, hyperlipidemia, obesity, and hypertension.

Fucoidan in the food industry. Safety of fucoidan-based additives. The food industry uses macroalgae: in fact, 85% of all harvested macroalgae are used for this purpose [138]. The most popular microalgae are those grown in aquaculture. In 2019, 34.7 million tons of macroalgae were collected in artificial conditions, compared to only 1.1 million tons harvested in natural conditions [139]. Macroalgae are incorporated into traditional food products, creating foods fortified with macronutrients and bioactive compounds and intended for a broad segment of the population, especially in regions with no coastline [140].

Macroalgae biomass is used to produce agar, iodine, and phlorotannin but not fucoidan. Aquaculture-grown *C. okurana* is the only macroalgae used for industrial-

scale fucoidan production [14]. However, fucoidan can be extracted from other macroalgae, e.g., *S. japonica*, *U. pinatifida*, *F. vesiculosus*, etc. [138]. Sulfated polysaccharide has powerful therapeutic potential. Consequently, fucoidan holds significant potential as a pharmaceutical ingredient or functional food component, although the commercial development of such products remains in the early stages. Future formulations are anticipated to aid in the prevention and management of diverse disorders, particularly metabolic syndrome-associated conditions such as obesity, cardiovascular disease, and diabetes [14, 141].

The contemporary food market knows very few fucoidan-based products [14, 25, 141–147] (Fig. 5), and detailed descriptions of such functional products are virtually absent from scientific literature. Specifically, the only available references feature fucoidan being used in Japan as an ingredient in beverages, dietary supplements, and pills [14]. A. R. Ribeiro *et al.* [142] developed a pasta recipe based on *F. vesiculosus* flour. The flour content was 4–5%. This pasta composition was further fortified with iodine. For pasta with 5% seaweed, the iodine content reached 650–3,650 µg per 100 g of raw pasta. Therefore, seaweed can be used to fortify traditional formulations with fucoidan and iodine [14, 142]. Such foods are recommended for people with hypertension, as well as those with disorders of lipid and glucose metabolism [143, 147]. In such foods, yeast fermentation occurs during the proofing process [145]. Baker's yeast can metabolize galactose, a component of fucoidan. For instance, more gas was produced during proofing in the presence of fucoidan than in control samples [143]. Bread fortified with fucoidan demonstrated antioxidant and anticancer properties (against MCF-7 breast cancer cell line) [25]. Fucoidan can be used in cookie formulations. The functional cookies developed by X. Zhou [147] had a pleasant aroma and flavor while being able to lower blood glucose and promote weight management.

Some scientific publications introduced novel fucoidan-based beverages [148, 149]. One of them featured a functional cocktail drink containing fucoidan, *Triticum spelta*, *Morus australis*, carrots, cruciferous vegetables,

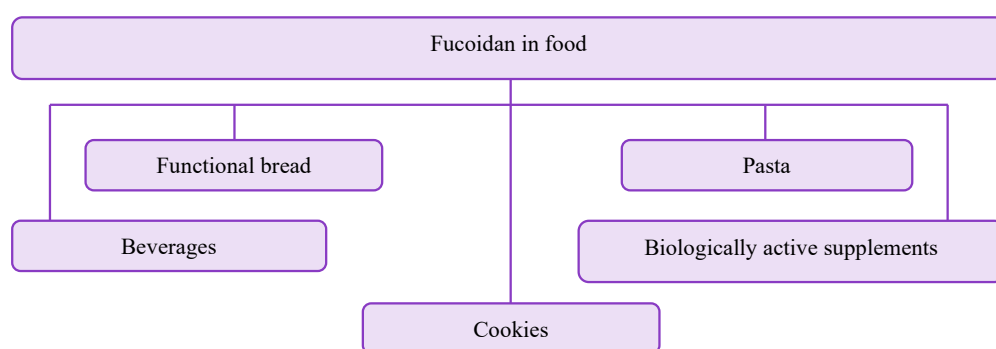


Figure 5. Fucoidan as a functional food ingredient

Рисунок 5. Расхождения в результатах исследований антикоагулянтной активности фукоидана

and fruits (pineapple, guava, noni, and passion fruit). Being able to slow down the progression of colorectal cancer, it can be used in combination with other therapies. The efficacy of this beverage was confirmed *in vitro* and *in vivo* (using a mouse model with tumors). The fucoidan complex demonstrated no side effects. It inhibited cell cycle regulators, the production of proapoptotic proteins, and the disruption of markers that induce the epithelial-mesenchymal transition [148]. Clinical trials of another fucoidan-based herbal beverage also revealed a favorable therapeutic effect. This beverage consisted of water, fucoidan (200 mg), radish seeds, hawthorn seeds, apple juice, green tea powder, broccoli powder, pectin, erythritol, malic acid, citric acid, stevia, sucralose, flavors, and fragrances. It was able to reduce or totally eliminate the bacterial load of *Helicobacter pylori* on the gastric mucosa [149].

Unfortunately, we were unable to find more information about fucoidan as a functional ingredient or the effectiveness of fucoidan-based foods. Nevertheless, the limited information in this study suggests the potential of fucoidan as a bioactive ingredient in functional foods that can normalize gastrointestinal function, promote beneficial intestinal bacteria, enhance human immune status, and improve metabolism [150].

Expanding the polysaccharide-based range of food products is an important challenge because polysaccharides are indispensable for human life. To do that, scientific community, technologists, and food industry engineers need to develop unified technology for producing macroalgae from biomass and purifying fucoidan. This achievement would enable industrial production of a reliable bioactive ingredient. Meeting the demand for fucoidan-based nutrition necessitates increasing either wild seaweed collection or macroalgae cultivation.

Conclusion

This review covered relevant publications and documents on the heterogeneous sulfated polysaccharide fucoidan found in marine algae to organize available information on its structure. This natural molecule possesses a heterogeneous, branched structure and a variable monosaccharide composition, including fucose, galactose, mannose, xylose, and glucuronic acid. Additionally, fucoidan varies in sulfation and molecular weight. The structural features of fucoidan depend on the type of algae, harvest season, water temperature, and extraction method.

The main sources of fucoidan include *Ascophyllum nodosum*, *Fucus vesiculosus*, *Nizamuddinina zanardinii*, *Undaria pinnatifida*, *Sargassum ilicifolium*, *Sargassum myriocystum*, and *Turbinaria decurrens*. The highest

content of heterogeneous polysaccharides ($\leq 24\%$ d.w.) was observed at a growth temperature of 10–17 °C, indicating a significant effect of seasonality on fucoidan yield and chemical structure.

The review provides a detailed description of the various methods used to extract and purify fucoidan, including microwave, ultrasonic, enzymatic, hot water, and acid extractions. Microwave extraction was found to provide the highest fucoidan yield ($\leq 18.2\%$) in the shortest amount of time while preserving the native structure of the polysaccharide. However, the lack of a unified technology for producing fucoidan with stable physicochemical properties hinders its application and Good Manufacturing Practice standardization.

Its biological activity depends on molecular weight, sulfation, fucose, and uronic acids. The mechanisms of fucoidan action remain partially understudied or contradictory, highlighting clear avenues for future research.

In the food industry, fucoidan is a promising and safe ingredient for functional foods. However, the list of commercial products fortified with fucoidan is disappointingly short. No publications featured results of clinical trials of novel fucoidan-based foods. Therefore, establishing new strategies to optimize production parameters and develop standardized purification protocols represents a key priority in biotechnology. Novel approaches will make it possible to turn fucoidan into a full-fledged functional ingredient and expand the range of functional foods.

Contributions

D.I. Malkov and S.A. Sukhikh developed the research concept, designed the methodology, analyzed and interpreted the data. S.A. Sukhikh supervised the project. S.A. Sukhikh and N. Barzkar provided the formal analysis. D.I. Malkov, E.V. Kashirskikh, and K.A. Balashova wrote and proofread the review.

Conflict of interest

The authors state that there is no conflict of interest.

Критерии авторства

Д. И. Мальков и С. А. Сухих – концепция исследования, методология, анализ и интерпретация данных. С. А. Сухих – общее руководство проектом. С. А. Сухих и Н. Барзкар – формальный анализ. Д. И. Мальков, Е. В. Каширских и К. А. Балашова – написание и редактирование статьи.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

References / Список литературы

1. Manisha P, Rohit KV, Shubhini AS. Nutraceuticals: New era of medicine and health. Asian Journal of Clinical Nutrition. 2010;3(1):11–15.

2. Vo T-S, Kim S-K. Fucoidans as a natural bioactive ingredient for functional foods. *Journal of Functional Foods*. 2013;5(1):16–27. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2012.08.007>
3. Espín JC, García-Conesa MT, Tomás-Barberán FA. Nutraceuticals: Facts and fiction. *Phytochemistry*. 2007;68:2986–3008. <https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2007.09.014>
4. Liu X, Du P, Liu X, Cao S, Qin L, *et al.* Anticoagulant properties of a green algal phamnan-type sulfated polysaccharide and its low-molecular-weight fragments prepared by mild acid degradation. *Marine Drugs*. 2018;16:445. <https://doi.org/10.3390/md16110445>
5. Gomes DL, Melo KRT, Queiroz MF, Batista LANC, Santos PC, *et al.* *In vitro* studies reveal antiurolithic effect of antioxidant sulfated polysaccharides from the green seaweed *Caulerpa cupressoides* var *flabellate*. *Marine Drugs*. 2019;17:326. <https://doi.org/10.3390/md17060326>
6. Luthuli S, Wu S, Cheng Y, Zheng X, Wu M, *et al.* Therapeutic effects of fucoidan: A review on recent studies. *Marine Drugs*. 2019;17:487. <https://doi.org/10.3390/md17090487>
7. Mensah EO, Kanwugu ON, Panda PK, Adadi P. Marine fucoidans: Structural, extraction, biological activities and their applications in the food industry. *Food Hydrocoll*. 2023;142:108784. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2023.108784>
8. Yoo HJ, You D-J, Lee K-W. Characterization and immunomodulatory effects of high molecular weight fucoidan fraction from the Sporophyll of *Undaria pinnatifida* in cyclophosphamide-induced immunosuppressed mice. *Marine Drugs*. 2019;17:447. <https://doi.org/10.3390/md17080447>
9. Li B, Lu F, Wei X, Zhao R. Fucoidan: Structure and bioactivity. *Molecules*. 2018;13:1671–1695. <https://doi.org/10.3390/molecules13081671>
10. Zhang X, Thomsen M. Techno-economic and environmental assessment of novel biorefinery designs for sequential extraction of high-value biomolecules from brown macroalgae *Laminaria digitata*, *Fucus vesiculosus*, and *Saccharina latissima*. *Algal Research*. 2021;60:102499. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2021.102499>
11. Lee I-S, Ko S-J, Lee YN, Lee G, Rahman MH, *et al.* The effect of *Laminaria japonica* on metabolic syndrome: A systematic review of its efficacy and mechanism of action. *Nutrients*. 2022;14:3046. <https://doi.org/10.3390/nu14153046>
12. Yu Y, Shen MY, Song QQ, Xie JH. Biological activities and pharmaceutical applications of polysaccharide from natural resources: A review. *Carbohydrate Polymers*. 2018;183:91–101. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2017.12.009>
13. Zayed A, Muffler K, Hahn T, Rupp S, Finkelmeier D, *et al.* Physicochemical and biological characterization of fucoidan from *Fucus vesiculosus* purified by dye affinity chromatography. *Marine Drugs*. 2016;14 (4):79. <https://doi.org/10.3390/md14040079>
14. Anisha GS, Padmakumari S, Patel AK, Pandey A, Singhanian RR. Fucoidan from marine macroalgae: Biological actions and applications in regenerative medicine, drug delivery systems and food industry. *Bioengineering*. 2022;9(9):472. <https://doi.org/10.3390/bioengineering9090472>
15. Foley SA, Szegezdi E, Mulloy B, Samali A, Tuohy MG. An unfractionated fucoidan from *Ascophyllum nodosum*: Extraction, characterization, and apoptotic effects *in vitro*. *Journal of Natural Products*. 2011;74(9):1851–1861. <https://doi.org/10.1021/np200124m>
16. Yuan Y, Macquarrie D. Microwave assisted extraction of sulfated polysaccharides (fucoidan) from *Ascophyllum nodosum* and its antioxidant activity. *Carbohydrate Polymers*. 2015;129:101–107. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2015.04.057>
17. Getachew AT, Holdt SL, Meyer AS, Jacobsen C. Effect of extraction temperature on pressurized liquid extraction of bioactive compounds from *Fucus vesiculosus*. *Marine Drugs*. 2022;20:263. <https://doi.org/10.3390/md20040263>
18. Rodriguez-Jasso R, Mussatto S, Pastrana L, Aguilar C, Teixeira J. Chemical composition and antioxidant activity of sulphated polysaccharides extracted from *Fucus vesiculosus* using different hydrothermal processes. *Chemical Papers*. 2014;68:203–209. <https://doi.org/10.2478/s11696-013-0430-9>
19. Wei B, Zhong Q-W, Ke S-Z, Zhou T-S, Xu Q-L, *et al.* *Sargassum fusiforme* polysaccharides prevent high-fat diet-induced early fasting hypoglycemia and regulate the gut microbiota composition. *Marine Drugs*. 2020;18:444. <https://doi.org/10.3390/md18090444>
20. Badrinathan S, Shiju TM, Christa S, Arya AS, Pragasam V. Purification and structural characterization of sulfated polysaccharide from *Sargassum myriocystum* and its efficacy in scavenging free radicals. *Indian Journal of Pharmaceutical Sciences*. 2012;74(6):549–555. <https://doi.org/10.4103/0250-474X.110600>
21. Fletcher HR, Biller P, Ross AB, Adams JMM. The seasonal variation of fucoidan within three species of brown macroalgae. *Algal Research*. 2017;22:79–86. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2016.10.015>
22. Shanthi N, Arumugam P, Murugan M, Sudhakar MP, Arunkumar K. Extraction of fucoidan from *Turbinaria decurrens* and the synthesis of fucoidan-coated AgNPs for anticoagulant application. *ACS Omega*. 2021;6:30998–31008. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c03776>
23. Zayed A, Ulber R, El-Aasr M, Ibrahim ARS. Fucoidan characterization: Determination of purity and physicochemical and chemical properties. *Marine Drugs*. 2020;18:571. <https://doi.org/10.3390/md18110571>

24. Aguilar-Briseño JA, Cruz-Suarez LE, Ricque-Marie D, Zapata-Benavides P, Mendoza-Gamboa E, et al. Sulphated polysaccharides from *Ulva clathrata* and *Cladosiphon okamuranus* seaweeds both inhibit viral attachment/entry and cell-cell fusion, in NDV infection. *Marine Drugs*. 2015;13:697–712. <https://doi.org/10.3390/md13020697>
25. Zhao Y, Zheng YZ, Wang J, Ma SY, Yu YM, et al. Fucoidan extracted from *Undaria pinnatifida*: Source for nutraceuticals/functional foods. *Marine Drugs*. 2018;16:321. <https://doi.org/10.3390/md16090321>
26. Wang SH, Huang CY, Chen CY, Chang CC, Huang CY, et al. Structure and biological activity analysis of fucoidan isolated from *Sargassum siliculosum*. *ACS Omega*. 2020;5(50):32447–32455. <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c04591>
27. Tako M. Rheological characteristics of fucoidan isolated from commercially cultured *Cladosiphon okamuranus*. *Botanica Marina*. 2003;46:465. <https://doi.org/10.1515/BOT.2003.047>
28. Usoltseva RV, Anastyuk SD, Surits VV, Shevchenko NM, Thinh PD, et al. Comparison of structure and *in vitro* anticancer activity of native and modified fucoidans from *Sargassum feldmannii* and *S. duplicatum*. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2019;124:220–228. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.11.223>
29. Usoltseva RV, Shevchenko NM, Malyarenko OS, Anastyuk SD, Kasprik AE, et al. Fucoidans from brown algae *Laminaria longipes* and *Saccharina cichorioides*: Structural characteristics, anticancer and radio-sensitizing activity *in vitro*. *Carbohydrate Polymers*. 2019;221:157–165. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.05.082>
30. Lahrsen E, Liewert I, Alban S. Gradual degradation of fucoidan from *Fucus vesiculosus* and its effect on structure, antioxidant and antiproliferative activities. *Carbohydrate Polymers*. 2018;192:208–216. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.03.076>
31. Koh A, Lu J, Zhou W. Structure characterization and antioxidant activity of fucoidan isolated from *Undaria pinnatifida* grown in New Zealand. *Carbohydrate Polymers*. 2019;212:178–185. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.02.040>
32. Pozharitskaya ON, Shikov AN, Faustova NM, Obluchinskaya ED, Kosman VM, et al. Pharmacokinetic and tissue distribution of fucoidan from *Fucus vesiculosus* after oral administration to rats. *Marine Drugs*. 2018;16:132. <https://doi.org/10.3390/md16040132>
33. Nishitsuji K, Arimoto A, Higa Y, Mekaru M, Kawamitsu M, et al. Draft genome of the brown alga, *Nemacystus decipiens*, Onna-1 strain: Fusion of genes involved in the sulfated fucan biosynthesis pathway. *Scientific Reports*. 2019;9:4607. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-40955-2>
34. Skriptsova AV, Shevchenko NM, Zvyagintseva TN, Imbs TI. Monthly changes in the content and monosaccharide composition of fucoidan from *Undaria pinnatifida* (Laminariales, Phaeophyta). *Journal of Applied Phycology*. 2010;22(1):79–86. <https://doi.org/10.1007/s10811-009-9438-5>
35. Kadena K, Tomori M, Iha M, Nagamine T. Absorption study of mozuku fucoidan in Japanese volunteers. *Marine Drugs*. 2018;16:254. <https://doi.org/10.3390/md16080254>
36. Domingues B, Lopes JM, Soares P, Pópulo H. Melanoma treatment in review. *ImmunoTargets and Therapy*. 2018;7:35–49. <https://doi.org/10.2147/itt.s134842>
37. Rocha de Souza MC, Marques CT, Guerra Dore CM, Ferreira da Silva FR, Oliveira Rocha HA, et al. Antioxidant activities of sulfated polysaccharides from brown and red seaweeds. *Journal of Applied Phycology*. 2007;19(2):153–160. <https://doi.org/10.1007/s10811-006-9121-z>
38. Sun T, Zhang X, Miao Y, Zhou Y, Shi J, et al. Studies on antiviral and immuno-regulation activity of low molecular weight fucoidan from *Laminaria japonica*. *Journal of Ocean University of China*. 2018;3:705–711. <https://doi.org/10.1007/s11802-018-3794-1>
39. Mak W, Hamid N, Liu T, Lu J, White WL. Fucoidan from New Zealand *Undaria pinnatifida*: Monthly variations and determination of antioxidant activities. *Carbohydrate Polymers*. 2013;95:606–614. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2013.02.047>
40. Honya M, Mori H, Anzai M, Araki Y, Nishizawa K. Monthly changes in the content of fucans, their constituent sugars and sulphate in cultured *Laminaria japonica*. *Hydrobiologia*. 1999;398:411–416. https://doi.org/10.1007/978-94-011-4449-0_49
41. Leandro A, Pacheco D, Cotas J, Marques JC, Pereira L, et al. Seaweed's bioactive candidate compounds to food industry and global food security. *Life*. 2020;10:140. <https://doi.org/10.3390/life10080140>
42. McNeely WH. Fucoidan. In: Whistler RL, Bemiller JN, editors. *Industrial gums, polysaccharides and their derivatives*. New York: Academic Press; 1959. pp. 117–125.
43. Dias APS, Rijo B, Santos F, Santos RG, Frade T, et al. Overview on biofuels production in a seaweed biorefinery. *Science of the Total Environment*. 2023;884:163714. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163714>
44. Zahariev N, Katsarov P, Lukova P, Pilicheva B. Novel fucoidan pharmaceutical formulations and their potential application in oncology – a review. *Polymers*. 2023;15(15):3242. <https://doi.org/10.3390/polym15153242>
45. Venkatesan J, Bhatnagar I, Kim SK. Chitosan-alginate biocomposite containing fucoidan for bone tissue engineering. *Marine Drugs*. 2014;12(1):300–316. <https://doi.org/10.3390/md12010300>
46. Fitton JH, Stringer DN, Karpiniec SS. Therapies from fucoidan: An update. *Marine Drugs*. 2015;13(9):5920–5946. <https://doi.org/10.3390/md13095920>
47. Boo HJ, Hyun JH, Kim SC, Kang JI, Kim MK, et al. Fucoidan from *Undaria pinnatifida* induces apoptosis in A549 human lung carcinoma cells. *Phytotherapy Research*. 2011;25(7):1082–1086. <https://doi.org/10.1002/ptr.3489>

48. Ramanan R, Kim BH, Cho DH, Oh HM, Kim HS. Algae-bacteria interactions: Evolution, ecology and emerging applications. *Biotechnology Advances*. 2016;34(1):14–29. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2015.12.003>
49. Kuznetsova TA, Ivanushko LA, Persyanova EV, Shutikova AL, Ermakova SP, *et al.* Evaluation of adjuvant effects of fucoidane from brown seaweed *Fucus evanescens* and its structural analogues for the strengthening vaccines effectiveness. *Biomeditsinskaya Khimiya*. 2017;63:553–558. (In Russ.). [Кузнецова Т. А., Иванушко Л. А., Персиянова Е. В., Шутикова А. Л., Ермакова С. П. и др. Оценка адъювантных эффектов фукоидана из бурой водоросли *Fucus evanescens* и его структурных аналогов для усиления эффективности вакцин. Биомедицинская химия. 2017. № 63. С. 553–558.] <https://doi.org/10.18097/PBMC20176306553>
50. Yu J, Li Q, Wu J, Yang X, Yang S, *et al.* Fucoidan extracted from sporophyll of *Undaria pinnatifida* grown in Weihai, China – chemical composition and comparison of antioxidant activity of different molecular weight fractions. *Frontiers in Nutrition*. 2021;8:636930. <https://doi.org/10.3389/fnut.2021.636930>
51. Kidgell JT, Magnusson M, Nys de R, Glasson CRK. Ulvan: A systematic review of extraction, composition and function. *Algal Research*. 2019;39:101422. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2019.101422>
52. Flórez-Fernández N. Extraction and purification of fucoidan from marine sources. In: Kim S-K, editor. *Encyclopedia of marine biotechnology*. Hoboken: John Wiley & Sons; 2020. pp. 1093–1125.
53. Rodriguez-Jasso RM, Mussatto SI, Pastrana L, Aguilar CN, Teixeira JA. Microwave-assisted extraction of sulfated polysaccharides (fucoidan) from brown seaweed. *Carbohydrate Polymers*. 2011;86:1137–1144. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2011.06.006>
54. Alboofetileh M, Rezaei M, Tabarsa M, You SG. Ultrasound-assisted extraction of sulfated polysaccharide from *Nizamuddiniana zanardinii*: Process optimization, structural characterization, and biological properties. *Journal of Food Process Engineering*. 2019;42:e12979. <https://doi.org/10.1111/jfpe.12979>
55. Cassani L, Silva A, Carpena M, Pellegrini MC, García-Pérez P, *et al.* Phytochemical compounds with promising biological activities from *Ascophyllum nodosum* extracts using microwave-assisted extraction. *Food Chemistry*. 2024;438:138037. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.138037>
56. Agregán R, Munekata PES, Franco D, Carballo J, Barba FJ, *et al.* Antioxidant potential of extracts obtained from macro- (*Ascophyllum nodosum*, *Fucus vesiculosus* and *Bifurcaria bifurcata*) and micro-algae (*Chlorella vulgaris* and *Spirulina platensis*) assisted by ultrasound. *Medicines*. 2018;5:33. <https://doi.org/10.3390/medicines5020033>
57. Garcia-Vaquero M, Sweeney T, O'Doherty JV, Rajauria G, Tiwari BK. Enhancing the extraction of polysaccharides and antioxidants from macroalgae using sequential hydrothermal-assisted extraction followed by ultrasound and thermal technologies. *Marine Drugs*. 2019;17:457. <https://doi.org/10.3390/md17080457>
58. Patel AK, Vadrale AP, Singhanian RR, Michaud P, Pandey A, *et al.* Algal polysaccharides: Current status and future prospects. *Phytochemistry Reviews*. 2022;5:1–30. <https://doi.org/10.1007/s11101-021-09799-5>
59. Pagliaccia B. Insights on the recovery, characterization and valorization of extracellular polymeric substances (EPS) from granular sludge applied in innovative wastewater treatment systems. PhD diss. Florence: University of Florence; 2022. 241 p.
60. Yucui J, Bo Yu, Yubin JI. Research on extracting technique of fucoidan from *Undaria pinnatifida*. *China Modern Medicine*. 2009;16:69.
61. Song KM, Su JH, Lee JE, Kim SH, Yong HK, *et al.* High yield ultrasonication extraction method for *Undaria pinnatifida* sporophyll and its anti-inflammatory properties associated with AP-1 pathway suppression. *Food Science and Technology*. 2015;64(2):1315–1322. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.07.055>
62. Wang W. Study on Extraction of sulfated polysaccharides from Chinese cabbage by complex enzymatic hydrolysis. *Food Science*. 1999;20:26–29.
63. Kim WJ, Kim SM, Kim HG, Oh HR, Lee KB, *et al.* Purification and anticoagulant activity of a fucoidan from Korean *Undaria pinnatifida* sporophyll. *Journal of Microbiology and Biotechnology*. 2007;22(3):1043–247–252. <https://doi.org/10.4490/algal.2007.22.3.247>
64. Ścieszka S, Klewicka E. Algae in food: A general review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2018; 59(21):3538–3547. <https://doi.org/10.1080/10408398.2018.1496319>
65. Ponce NMA, Pujol CA, Damonte EB, Flores ML, Stortz CA. Fucoidans from the brown seaweed *Adenocystis utricularis*: Extraction methods, antiviral activity and structural studies. *Carbohydrate Research*. 2003;338:153–165. [https://doi.org/10.1016/S0008-6215\(02\)00403-2](https://doi.org/10.1016/S0008-6215(02)00403-2)
66. Otero P, Carpena M, Garcia-Oliveira P, Echave J, Soria-Lopez A, *et al.* Seaweed polysaccharides: Emerging extraction technologies, chemical modifications and bioactive properties. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2021; 63(13):1901–1929. <https://doi.org/10.1080/10408398.2021.1969534>
67. El-Sheekh MM, Ward F, Deyab MA, Al-Zahrani M, Touliabah HE. Chemical composition, antioxidant, and antitumor activity of fucoidan from the brown alga *Dictyota dichotoma*. *Molecules*. 2023;28:7175. <https://doi.org/10.3390/molecules28207175>

68. Ale MT, Meyer AS. Fucoidans from brown seaweeds: An update on structures, extraction techniques and use of enzymes as tools for structural elucidation. *RSC Advances*. 2013;3(22):8131–8141. <https://doi.org/10.1039/c3ra23373a>
69. Galermo AG, Nandita E, Barboza M, Amicucci MJ, Vo TTT, et al. Liquid chromatography – tandem mass spectrometry approach for determining glycosidic linkages. *Analytical Chemistry*. 2018;90(21):13073–13080. <https://doi.org/10.1021/acs.analchem.8b04124>
70. Wang X, Yia K, Zhao Y. Fucoidan inhibits amyloid- β -induced toxicity in transgenic *Caenorhabditis elegans* by reducing the accumulation of amyloid- β and decreasing the production of reactive oxygen species. *Food & Function*. 2018;9:552–560. <https://doi.org/10.1039/c7fo00662d>
71. Silchenko AS, Rasin AB, Kusaykin MI, Kalinovskiy AI, Miansong Z, et al. Structure, enzymatic transformation, anticancer activity of fucoidan and sulphated fucooligosaccharides from *Sargassum horneri*. *Carbohydrate Polymers*. 2017;175:654–660. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2017.08.043>
72. Mwangi HM, Westhuizen JVD, Marnewick J, Mabusela WT, Kabanda MM, et al. Isolation, identification and radical scavenging activity of phlorotannin derivatives from brown algae, *Ecklonia maxima*: An experimental and theoretical study. *Free Radical Biology and Medicine*. 2013;3:S1–S10. <https://doi.org/10.1016/j.fra.2013.10.006>
73. Soubra L, Sarkis D, Hilan C, Verger P. Dietary exposure of children and teenagers to benzoates, sulphites, butylhydroxytoluene (BHA) and butylhydroxytoluene (BHT) in Beirut (Lebanon). *Regulatory Toxicology and Pharmacology*. 2007;47:68–77. <https://doi.org/10.1016/j.yrtph.2006.07.005>
74. Wei H, Gao Z, Zheng L, Zhang C, Liu Z, et al. Protective effects of fucoidan on A β 25–35 and D-Gal-induced neurotoxicity in PC12 cells and D-Gal-induced cognitive dysfunction in mice. *Marine Drugs*. 2017;15:77. <https://doi.org/10.3390/md15030077>
75. Ren LL, Liu B, Zhong WH, Zhang QB, Jin WH. Structural features of sulfated glucuronomannan oligosaccharides and their antioxidant activity. *Marine Drugs*. 2018;16:291. <https://doi.org/10.3390/md16090291>
76. Huang CY, Kuo CH, Lee CH. Antibacterial and antioxidant capacities and attenuation of lipid accumulation in 3T3-L1 adipocytes by low-molecular-weight fucoidans prepared from compressional-puffing-pretreated *Sargassum crassifolium*. *Marine Drugs*. 2018;16:24. <https://doi.org/10.3390/md16010024>
77. Zayed A, Hahn T, Rupp S, Kramer R, Ulber R. Fucoidan as a natural anticoagulant, antiviral and anti-cancer drug. *Naunyn-Schmiedeberg's Archives of Pharmacology*. 2018;391:S7–S8. <https://doi.org/10.1007/s00210-018-147>
78. Jiao G, Yu G, Zhang J, Ewart HS. Chemical structures and bioactivities of sulfated polysaccharides from marine algae. *Marine Drugs*. 2011;9(2):196–223. <https://doi.org/10.3390/md9020196>
79. Cunha L, Grenha A. Sulfated seaweed polysaccharides as multifunctional materials in drug delivery applications. *Marine Drugs*. 2016;14:42. <https://doi.org/10.3390/md14030042>
80. Chen Q, Liu M, Zhang P, Fan S, Huang J, et al. Fucoidan and galacto-oligosaccharides ameliorate high-fat diet-induced dyslipidemia in rats by modulating the gut microbiota and bile acid metabolism. *Nutrition*. 2019;65:50–59. <https://doi.org/10.1016/j.nut.2019.03.001>
81. Liu Y, Liu S, Wu C, Huang W, Xu B, et al. PD-1-mediated PI3K/Akt/mTOR, caspase 9/caspase 3 and ERK pathways are involved in regulating the apoptosis and proliferation of CD4+ and CD8+ T cells during BVDV infection *in vitro*. *Frontiers in Immunology*. 2020;11. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2020.00467>
82. Elmore S. Apoptosis: A review of programmed cell death. *Toxicologic Pathology*. 2007;35(4):495–516. <https://doi.org/10.1080/01926230701320337>
83. Mi-Hyoung K, Hong-Gu J. Immunostimulatory effects of fucoidan on bone marrow-derived dendritic cells. *Immunology Letters*. 2008;115(2):138–143. <https://doi.org/10.1016/j.imlet.2007.10.016>
84. Nakamura T, Suzuki H, Wada Y, Kodama T, Doi T. Fucoidan induces nitric oxide production via p38 mitogen-activated protein kinase and NF- κ B-dependent signaling pathways through macrophage scavenger receptors. *Biochemical and Biophysical Research Communications*. 2006;343(1):286–294. <https://doi.org/10.1016/j.bbrc.2006.02.146>
85. Li R, Zhou QL, Chen ST, Tai MR, Cai HY, et al. Chemical characterization and immunomodulatory activity of fucoidan from *Sargassum hemiphyllum*. *Marine Drugs*. 2022;21(1):18. <https://doi.org/10.3390/md21010018>
86. Kwiatkowska E, Domański L, Dziedzic V, Kajdy A, Stefańska K, et al. The mechanism of drug nephrotoxicity and the methods for preventing kidney damage. *International Journal of Molecular Sciences*. 2021;22(11):6109. <https://doi.org/10.3390/ijms22116109>
87. Chen Y, Yao F, Ming K, Wang D, Hu Y, et al. Polysaccharides from traditional Chinese medicines: Extraction, purification, modification, and biological activity. *Molecules*. 2016;21(12):1705. <https://doi.org/10.3390/molecules21121705>
88. Pradhan B, Nayak R, Patra S, Bhuyan PP, Behera PK, et al. A state-of-the-art review on fucoidan as an antiviral agent to combat viral infections. *Carbohydrate Polymers*. 2022;291:119551. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2022.119551>
89. Hans N, Malik A, Naik S. Antiviral activity of sulfated polysaccharides from marine algae and its application in combating COVID-19: Mini review. *Bioresource Technology Reports*. 2021;13:100623. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2020.100623>

90. Park AY, Nafia I, Stringer DN, Karpiniec SS, Fitton JH. Fucoidan independently enhances activity in human immune cells and has a cytostatic effect on prostate cancer cells in the presence of nivolumab. *Marine Drugs*. 2021;20(1):12. <https://doi.org/10.3390/md20010012>
91. Usman A, Khalid S, Usman A, Hussain Z, Wang Y. Algal polysaccharides, novel application, and outlook. In: Zia KM, Zuber M, Ali M, editors. *Algae based polymers, blends, and composites*. Amsterdam: Elsevier; 2017. p. 115–153. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812360-7.00005-7>
92. Bello-Morales R, Andreu S, Ruiz-Carpio V, Ripa I, López-Guerrero JA. Extracellular polymeric substances: Still promising antivirals. *Viruses*. 2022;14(6):1337. <https://doi.org/10.3390/v14061337>
93. Wada H, Matsumoto T, Yamashita Y. Diagnosis and treatment of disseminated intravascular coagulation (DIC) according to four DIC guidelines. *Journal of Intensive Care*. 2014;2(1):15. <https://doi.org/10.1186/2052-0492-2-15>
94. Arepally GM, Cines DB. Pathogenesis of heparin-induced thrombocytopenia. *Translational Research*. 2020;225:131–140. <https://doi.org/10.1016/j.trsl.2020.04.014>
95. Yao Y, Yim EKF. Fucoidan for cardiovascular application and the factors mediating its activities. *Carbohydrate Polymers*. 2021;270:118347. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2021.118347>
96. Fitton JH. Therapies from fucoidan; Multifunctional marine polymers. *Marine Drugs*. 2011;9:1731–1760. <https://doi.org/10.3390/md9101731>
97. Wijesinghe WJ, Jeon YJ. Enzyme-assisted extraction (EAE) of bioactive components: a useful approach for recovery of industrially important metabolites from seaweeds: A review. *Fitoterapia*. 2012;83:6–12. <https://doi.org/10.1016/j.fitote.2011.10.016>
98. Barahona T, Encinas MV, Imarai M, Mansilla A, Matsuhira B, *et al.* Bioactive polysaccharides from marine algae. *Bioactive Carbohydrates and Dietary Fibre*. 2014;4(2):125–138. <https://doi.org/10.1016/j.bcdf.2014.09.002>
99. Qi Y, Wang L, You Y, Sun X, Wen C, *et al.* Preparation of low-molecular-weight fucoidan with anticoagulant activity by photocatalytic degradation method. *Foods*. 2022;11:822. <https://doi.org/10.3390/foods11060822>
100. Chevolut L, Foucault A, Chaubet F, Kervarec N, Sinquin C, *et al.* Further data on the structure of brown seaweed fucans: Relationships with anticoagulant activity. *Carbohydrate Research*. 1999;319:154–165. [https://doi.org/10.1016/S0008-6215\(99\)00127-5](https://doi.org/10.1016/S0008-6215(99)00127-5)
101. Juenet M, Aid-Launais R, Li B, Berger A, Aerts J, *et al.* Thrombolytic therapy based on fucoidan-functionalized polymer nanoparticles targeting P-selectin. *Biomaterials*. 2018;156:204–216. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2017.11.047>
102. Bilan MI, Grachev AA, Shashkov AS, Kelly M, Sanderson CJ, *et al.* Further studies on the composition and structure of a fucoidan preparation from the brown alga *Saccharina latissima*. *Carbohydrate Research*. 2010;345(14):2038–2047. <https://doi.org/10.1016/j.carres.2010.07.009>
103. Bai Y, Bai L, Zhou J, Chen H, Zhang L. Sequential delivery of VEGF, FGF-2 and PDGF from the polymeric system enhance HUVECs angiogenesis *in vitro* and CAM angiogenesis. *Cellular Immunology*. 2018;323:19–32. <https://doi.org/10.1016/j.cellimm.2017.10.008>
104. Matou S, Helley D, Chabut D, Bros A, Fischer AM. Effect of fucoidan on fibroblast growth factor-2-induced angiogenesis *in vitro*. *Thrombosis Research*. 2002;106(4–5):213–221. [https://doi.org/10.1016/S0049-3848\(02\)00136-6](https://doi.org/10.1016/S0049-3848(02)00136-6)
105. Turrini E, Maffei F, Fimognari C. Ten years of research on fucoidan and cancer: Focus on its antiangiogenic and antimetastatic effects. *Marine Drugs*. 2023;21(5):307. <https://doi.org/10.3390/md21050307>
106. Li Y, McGowan E, Chen S, Santos J, Yin H, *et al.* Immunopotentiating activity of fucoidans and relevance to cancer immunotherapy. *Marine Drugs*. 2023;21(2):128. <https://doi.org/10.3390/md21020128>
107. Myers SP, O'Connor J, Fitton JH. A combined phase I and II open label study on the effects of a seaweed extract nutrient complex. *Biologics: Targets and Therapy*. 2011;5:45–48. <https://doi.org/10.2147/BTT.S12535>
108. Choi EM, Kim AJ, Kim YO, Hwang JK. Immunomodulating activity of arabinogalactan and fucoidan *in vitro*. *Journal of Medicinal Food*. 2005;8:446–453. <https://doi.org/10.1089/jmf.2005.8.446>
109. Wang Y, Xing M, Cao Q, Ji A, Liang H, *et al.* Biological activities of fucoidan and the factors mediating its therapeutic effects: A review of recent studies. *Marine Drugs*. 2019;17:183. <https://doi.org/10.3390/md17030183>
110. Li Y, Zheng Y, Zhang Y, Yang Y, Wang P, *et al.* Brown algae carbohydrates: Structures, pharmaceutical properties, and research challenges. *Marine Drugs*. 2021;19(11):620. <https://doi.org/10.3390/md19110620>
111. Lukova P, Apostolova E, Baldzhieva A, Murdjeva M, Kokova V. Fucoidan from *Ericaria crinita* alleviates inflammation in rat paw edema, downregulates pro-inflammatory cytokine levels, and shows antioxidant activity. *Biomedicines*. 2023;11(9):2511. <https://doi.org/10.3390/biomedicines11092511>
112. Hałka JA, Spaleniak S, Kade G, Antosiewicz S, Sigorski D. The nephrotoxicity of drugs used in causal oncological therapies. *Current Oncology*. 2022;29(12):9681–9694. <https://doi.org/10.3390/curroncol29120760>
113. Cao P, Wu S, Wu T, Deng Y, Zhang Q, *et al.* The important role of polysaccharides from a traditional Chinese medicine – lung Cleansing and Detoxifying Decoction against the COVID-19 pandemic. *Carbohydrate Polymers*. 2020;240:116346. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116346>

114. Menshova RV, Shevchenko NM, Imbs TI, Zvyagintseva TN, Malyarenko OS, et al. Fucoidans from brown alga *Fucus evanescens*: Structure and biological activity. *Frontiers in Marine Science*. 2016;3:129. <https://doi.org/10.3389/fmars.2016.00129>
115. Andrew M, Jayaraman G. Marine sulfated polysaccharides as potential antiviral drug candidates to treat Corona Virus disease (COVID-19). *Carbohydrate Research*. 2021;505:108326. <https://doi.org/10.1016/j.carres.2021.108326>
116. Raihan T, Rabbee MF, Roy P, Choudhury S, Baek KH, et al. Microbial metabolites: The emerging hotspot of antiviral compounds as potential candidates to avert viral pandemic alike COVID-19. *Frontiers in Molecular Biosciences*. 2021;8:256. <https://doi.org/10.3389/fmolb.2021.732256>
117. Mitishev AV, Vodopyanova OA, Kurdyukov EE, Semenova EF, Fednina AS. Review of modern research in the field of chemistry and pharmacology of algae. *News of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2023;(2):184–196. (In Russ.). [Митишев А. В., Водопьянова О. А., Курдюков Е. Е., Семенова Е. Ф., Феднина А. С. Обзор современных исследований в области химии и фармакологии водорослей. *Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология*. 2023. № 2. С. 184–196.] <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2023-13-2-184-196>
118. Mayer AMS, Guerrero AJ, Rodríguez AD, Tagliatalata-Scafati O, Nakamura F, et al. Marine pharmacology in 2014–2015: Marine compounds with antibacterial, antidiabetic, antifungal, antiinflammatory, antiprotozoal, antituberculosis, antiviral, and anthelmintic activities; affecting the immune and nervous systems, and other miscellaneous mechanisms of action. *Marine Drugs*. 2020;18(1):5. <https://doi.org/10.3390/md18010005>
119. Vazquez SR. Drug-drug interactions in an era of multiple anticoagulants: A focus on clinically relevant drug interactions. *Blood*. 2018;132(21):2230–2239. <https://doi.org/10.1182/blood-2018-06-848747>
120. Yamada S, Asakura H. Therapeutic strategies for disseminated intravascular coagulation associated with aortic aneurysm. *International Journal of Molecular Sciences*. 2022;23(3):1296. <https://doi.org/10.3390/ijms23031296>
121. Pozharitskaya ON, Obluchinskaya ED, Shikov AN. Mechanisms of bioactivities of fucoidan from the brown seaweed *Fucus vesiculosus* L. of the Barents Sea. *Marine Drugs*. 2020;18(5):275. <https://doi.org/10.3390/md18050275>
122. Irhimeh MR, Fitton JH, Lowenthal RM. Pilot clinical study to evaluate the anticoagulant activity of fucoidan. *Blood Coagulation & Fibrinolysis*. 2009;20(7):607–610. <https://doi.org/10.1097/mbc.0b013e32833135fe>
123. Ganapathy S, Lingappa S, Naidu K, Selvaraj U, Ramachandiran S, et al. Isolation and bioactive potential of fucoidan from marine macroalgae *Turbinaria conoides*. *ChemistrySelect*. 2019;4:14114–14119. <https://doi.org/10.1002/slct.201903548>
124. Silchenko AS, Taran IV, Usoltseva RV, Zvyagintsev NV, Zueva AO, et al. The discovery of the fucoidan-active endo-1→4- α -L-fucanase of the GH168 family, which produces fucoidan derivatives with regular sulfation and anticoagulant activity. *International Journal of Molecular Sciences*. 2024;25(1):218. <https://doi.org/10.3390/ijms25010218>
125. Sanniyasi E, Gopal R, Damodharan R. *In vitro* anticancer potential of laminarin and fucoidan from brown seaweeds. *Scientific Reports*. 2023;13:14452. <https://elibrary.ru/JDSCFL>
126. Costa LS, Pereira GF, Telles CB. Antioxidant and antiproliferative activities of heterofucans from the seaweed *Sargassum filipendula*. *Marine Drugs*. 2011;9(6):952–966. <https://doi.org/10.3390/md9060952>
127. Pomim VK. Review: An overview about the structure-function relationship of marine sulfated homopolysaccharides with regular chemical structures. *Biopolymers*. 2009;91:601–609. <https://doi.org/10.1002/bip.21200>
128. Hsiao HH, Wu TC, Tsai YH, Kuo CH, Huang RH, et al. Effect of oversulfation on the composition, structure, and *in vitro* anti-lung cancer activity of fucoidans extracted from *Sargassum aquifolium*. *Marine Drugs*. 2021;19(4):215. <https://doi.org/10.3390/md19040215>
129. Ushakova NA, Morozevich GE, Ustyuzhanina NE, Bilan MI, Nifantiev NE, et al. Anticoagulant activity of fucoidans from brown algae. *Biomeditsinskaya Khimiya*. 2008;54(5):597–606.
130. Wang L, Zhang K, Ding X, Wang Y, Bai H, et al. Fucoidan antagonizes diet-induced obesity and inflammation in mice. *Journal of Biomedical Research*. 2020;35(3):197–205. <https://doi.org/10.7555/JBR.34.20200153>
131. Kim KT, Rioux LE, Turgeon SL. Alpha-amylase and alpha-glucosidase inhibition is differentially modulated by fucoidan obtained from *Fucus vesiculosus* and *Ascophyllum nodosum*. *Phytochemistry*. 2014;98:27–33. <https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2013.12.003>
132. Li S, Li J, Mao G, Wu T, Hu Y, et al. A fucoidan from sea cucumber *Pearsonothuria graeffei* with well-repeated structure alleviates gut microbiota dysbiosis and metabolic syndromes in HFD-fed mice. *Food & Function*. 2018;9:5371–5380. <https://doi.org/10.1039/C8FO01174E>
133. Singh V, Khurana A, Navik U, Allawadhi P, Bharani KK, et al. Apoptosis and pharmacological therapies for targeting thereof for cancer. *Therapeutics Science*. 2022;4(2):15. <https://doi.org/10.3390/sci4020015>
134. Madsen MS, Siersbæk R, Boergesen M, Nielsen R, Mandrup S. Peroxisome proliferator-activated receptor γ and C/EBP α synergistically activate key metabolic adipocyte genes by assisted loading. *Molecular and Cellular Biology*. 2014;34(6):939–954. <https://doi.org/10.1128/mcb.01344-13>
135. Moore KJ, Sheedy FJ, Fisher EA. Macrophages in atherosclerosis: A dynamic balance. *Nature Reviews Immunology*. 2013;13(10):709–721. <https://doi.org/10.1038/nri3520>

136. Zueva AO, Silchenko AS, Rasin AB, Malyarenko OS, Kusaykin MI, *et al.* Production of high- and low-molecular weight fucoidan fragments with defined sulfation patterns and heightened *in vitro* anticancer activity against TNBC cells using novel endo-fucanases of the GH107 family. *Carbohydrate Polymers*. 2023;318:121128. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2023.121128>
137. Yang Z, Wang H, Liu N, Zhao K, Sheng Y, *et al.* Algal polysaccharides and derivatives as potential therapeutics for obesity and related metabolic diseases. *Food & Function*. 2022;13:11387–11409. <https://doi.org/10.1039/d2fo02185d>
138. Lähteenmäki-Uutela A, Rahikainen M, Yang B, Camarena-Gómez MT, Piiparinen J, *et al.* European Union legislation on macroalgae products. *Aquaculture International*. 2021;29:487–509. <https://doi.org/10.1007/s10499-020-00633-x>
139. Cai J, Lovatelli A, Aguilar-Manjarrez J, Cornish L, Dabbadie L, *et al.* Seaweeds and microalgae: An overview for unlocking their potential in global aquaculture development. *FAO Fisheries and Aquaculture Circular*. 2021;1229. <https://doi.org/10.4060/cb5670en>
140. Wu J. The enhanced permeability and retention (EPR) effect: The significance of the concept and methods to enhance its application. *Journal of Personalized Medicine*. 2021;11(8):771. <https://doi.org/10.3390/jpm11080771>
141. Oliveira RM, Barros R, Gomes C, Fernanda J, Monte S, *et al.* Commercial fucoidans from *Fucus vesiculosus* can be grouped into antiadipogenic and adipogenic agents. *Marine Drugs*. 2018;16:193. <https://doi.org/10.3390/md16060193>
142. Ribeiro AR, Madeira T, Botelho G, Martins D, Ferreira RM, *et al.* Brown algae *Fucus vesiculosus* in pasta: Effects on textural quality, cooking properties, and sensorial traits. *Foods*. 2022;11(11):1561. <https://doi.org/10.3390/foods11111561>
143. Koh HSA, Zhou W, Chong JEL, Lu J. Fucoidan regulates starch digestion: *in vitro* and mechanistic study. *Foods*. 2022;11(3):427. <https://doi.org/10.3390/foods11030427>
144. Yoon SH, Mukerjee R, Robyt JF. Specificity of yeast (*Saccharomyces cerevisiae*) in removing carbohydrates by fermentation. *Carbohydrate Research*. 2003;338:1127–1132. [https://doi.org/10.1016/S0008-6215\(03\)00097-1](https://doi.org/10.1016/S0008-6215(03)00097-1)
145. Wilkinson J. The pathway of the adaptive fermentation of galactose by yeast. *Biochemical Journal*. 1949;44:460–467. <https://doi.org/10.1042/bj0440460>
146. Koh HSA, Lim SEV, Lu J, Zhou W. Bioactivity enhancement of fucoidan through complexing with bread matrix and baking. *LWT*. 2020;130:109646. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109646>
147. Zhou X. Research and development of two kinds of functional food. PhD diss. Beijing: Ocean University of China; 2011.
148. Chan CH, Deng YH, Peng BY, Chiang PC, Wu LA, *et al.* Anti-colorectal cancer effects of fucoidan complex-based functional beverage through retarding proliferation, cell cycle and epithelial–mesenchymal transition signaling pathways. *Integrative Cancer Therapies*. 2023;22:15347354231213613. <https://doi.org/10.1177/15347354231213613>
149. Teng QL, Sui SJ, Zhu Z, Gao Q, Ge H, *et al.* A fucoidan plant drink reduces *Helicobacter pylori* load in the stomach: A real-world study. *Translational Gastroenterology and Hepatology*. 2023;8:34. <https://doi.org/10.21037/tgh-23-63>
150. Guo G, Yang W, Fan C, Lan R, Gao Z, *et al.* The effects of fucoidan as a dairy substitute on diarrhea rate and intestinal barrier function of the large intestine in weaned lambs. *Frontiers in Veterinary Science*. 2022;9:1007346. <https://doi.org/10.3389/fvets.2022.1007346>

Additional information about the authors / Дополнительная информация об авторах

Danil I. Malkov / Мальков Данил Игоревич eLIBRARY SPIN 3775-2325

Stanislav A. Sukhikh / Сухих Станислав Алексеевич ORCID 0000-0001-7910-8388; eLIBRARY SPIN 1601-6061

Egor V. Kashirskikh / Каширских Егор Владимирович ORCID 0000-0003-0442-5471; eLIBRARY SPIN 3649-9933

Noora Barzkar / Барзкар Нура ORCID 0000-0001-9694-9138

<https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-2-2647>
<https://elibrary.ru/XNQQLG>

Оригинальная статья
<https://fptt.ru>

Валидация как инструмент системы менеджмента безопасности пищевой продукции птицеперерабатывающего производства



А. А. Чурышева¹, Т. В. Сухинина², К. В. Есепенок^{2,*}

¹ АО «Куриное Царство» филиал «Узловская птицефабрика», Пашково, Россия

² Московская государственная академия ветеринарной медицины и биотехнологии – МВА им. К. И. Скрябина, Москва, Россия

Поступила в редакцию: 01.02.2026

Принята после рецензирования: 05.03.2026

Принята к публикации: 05.05.2026

*e-mail: kv@esepenok.ru

© А. А. Чурышева, Т. В. Сухинина, К. В. Есепенок, 2026



Аннотация.

Пищевая и перерабатывающая промышленность требует постоянного повышения безопасности сырья и готовой продукции. Микробиологическая безопасность представляет собой одно из основных направлений обеспечения контроля рисков на всех этапах цепочки «от поля до тарелки». Цель исследования – оценить объективность методов антимикробной интервенции (обработки) на технологических этапах производства и проверить соответствие оборудования для замораживания и хранения продукции из мяса птицы микробиологическим требованиям.

Объекты исследования – микробиологические риски на технологической линии переработки цыплят-бройлеров на предприятии АО «Куриное Царство» филиал «Узловская птицефабрика» (Пашково, Россия). Методологическая основа – принципы ХАССП и требования системы менеджмента безопасности пищевой продукции (FSSC 22000 v.6.0). Отбор проб проводили после эвтаназии, снятия пера, обработки в дип-танке с раствором надуксусной кислоты концентрацией 500 ppm, ручного потрошения и обработки в спрей-кабине. Анализ включал определение показателей КМАФАнМ, наличия *Salmonella* spp. и *Listeria monocytogenes*, а также валидацию холодильного оборудования по времени и температуре замораживания.

Установлено, что обработка в дип-танке снижает содержание КМАФАнМ с 8×10^5 до 4×10^3 КОЕ/г. Однако этап ручного потрошения является критической точкой вторичной контаминации, т. к. после него микробиологическая обсемененность возрастает до $2,4 \times 10^4$ КОЕ/г, а доля тушек с *Salmonella* spp. достигает 100 %. Валидация замораживания подтвердила обеспечение температуры не выше -12°C в толще продукта. Микробиологические показатели замороженной продукции не превышали $5,0 \times 10^5$ КОЕ/г.

Доказана результативность системы менеджмента безопасности пищевой продукции. Рекомендовано усилить контроль на этапе потрошения, увеличить концентрацию надуксусной кислоты до 700 ppm и ввести мониторинг смывов с оборудования и рук персонала.

Ключевые слова. Валидация, система менеджмента безопасности пищевой продукции, ХАССП, микробиологическая безопасность, птицепереработка, антимикробная интервенция, замораживание, оценка рисков, пищевое производство

Для цитирования: Чурышева А. А., Сухинина Т. В., Есепенок К. В. Валидация как инструмент системы менеджмента безопасности пищевой продукции птицеперерабатывающего производства. Техника и технология пищевых производств. 2026. Т. 56. № 2. С. 422–433. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-2-2647>

Validation as a Tool of Food Safety Management in Poultry Processing



Anna A. Churyшева¹, Tatyana V. Sukhinina² ,
Konstantin V. Esepenok^{2,*}

¹ JSC Kurinoe Tsarstvo, Uzlovskaya Ptitsefabrika Poultry Farm, Pashkovo, Russia

² Moscow State Academy of Veterinary Medicine and Biotechnology – MVA named after K.I. Skryabin, Moscow Russia

Received: 01.02.2026
Revised: 05.03.2026
Accepted: 05.05.2026

*e-mail: kv@esepepenok.ru
© A.A. Churyшева, T.V. Sukhinina, K.V. Esepenok, 2026



Abstract.

The food industry requires continuous safety improvements for raw materials and finished products. In this context, microbiological safety is a critical aspect of ensuring food safety from farm to fork. This research evaluated various antimicrobial protocols across different technological stages, as well as validated freezing and storage equipment for compliance with microbiological standards for poultry products.

The study focused on a broiler chicken processing line at the Kurinoe Tsarstvo joint-stock company (a branch of the Uzlovskaya Poultry Farm, Pashkovo, Russia). The assessment methodology relied on HACCP principles and the food safety management system (FSSC 22000 v.6.0). The sampling was conducted after stunning and bleeding, defeathering, deep-tank immersion treatment in a 500 ppm peracetic acid solution, manual evisceration, and spray cabin chilling. The microbiological analysis included the determination of aerobic plate counts (QMAFAnM), *Salmonella* spp., and *Listeria monocytogenes*, alongside the validation of refrigeration equipment based on freezing time and temperature profile.

The deep-tank immersion treatment significantly reduced the aerobic plate counts from 8×10^5 to 4×10^3 CFU/g. However, the manual evisceration was identified as a critical stage for secondary contamination: it increased total bacterial counts to 2.4×10^4 CFU/g, with the prevalence of *Salmonella* spp. on the carcasses reaching 100%. The freezing validation confirmed that the internal product temperature successfully reached ≤ -12 °C, with the microbiological parameters of the final frozen products remaining safely below 5.0×10^5 CFU/g.

Although the established food safety management system proved effective overall, the findings highlight the need for stricter control during the evisceration stage. A higher concentration of peracetic acid (700 ppm) and mandatory monitoring of hand hygiene and equipment sanitation are strongly recommended.

Keywords. Validation, food safety management system, HACCP, microbiological safety, poultry processing, antimicrobial intervention, freezing, risk assessment, food production

For citation: Churyшева AA, Sukhinina TV, Esepenok KV. Validation as a Tool of Food Safety Management in Poultry Processing. Food Processing: Techniques and Technology. 2026;56(2):422–433. (In Russ.) <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-2-2647>

Введение

Пищевая и перерабатывающая промышленность представляет собой системообразующую сферу экономики страны, формирующую агропродовольственный рынок, для которого необходимо постоянное повышение безопасности пищевого сырья и готовой продукции. Основу производства продуктов питания составляет обеспечение их питательной ценности и безопасности. Будущее международное партнерство в области безопасности пищевой продукции невозможно без специальных знаний и соблюдения ключевых принципов, включающих разнообразие, цикличность, адаптивность, масштабируемость, надежность, эффективность, доступность, справедливость, охрану здоровья и безопасность [1–3]. В Доктрине продовольственной без-

опасности Российской Федерации сформулированы цели и задачи гарантирования продовольственной безопасности, при этом стратегической целью выступает снабжение населения страны безопасной, качественной и доступной сельскохозяйственной продукцией, сырьем и продовольствием в объемах, соответствующих рациональным нормам потребления [4, 5].

Одним из крупнейших производителей мясной продукции в России является группа компаний (ГК) «Черкизово» (Москва, Россия). Согласно отчетности за 2024 г. и три квартала 2025 г., компания увеличила выпуск мяса курицы, индейки, свинины и продуктов мясопереработки, что, в свою очередь, подтверждает статус одного из флагманов российского агропромышленного комплекса, который вносит значимый вклад

в продовольственную безопасность страны. Предприятия ГК «Черкизово» придерживаются стратегии усиления контроля на всех этапах производственного цикла «от поля до прилавка», гарантируя потребителям стабильные поставки безопасной и качественной продукции по доступной цене.

Микробиологическая безопасность на пищевых производствах выступает одним из основных направлений контроля безопасности готовой продукции на всех этапах цепочки «от поля до тарелки». Методы борьбы с патогенными микроорганизмами, в т. ч. с сальмонеллой, в производстве мясной продукции включают систему обеспечения безопасности, основанную на оценке рисков. Внедрение новых систем контроля качества, базирующихся на оценке рисков, сталкивается с рядом препятствий: затраты на внедрение и валидацию, недостаточная осведомленность о пищевой цепочке и др. [6–8].

Разнообразие методов производства, постоянное расширение цепочки создания продукции и потенциальные риски требуют детального внимания к системе ХАССП на современном предприятии. Для обеспечения безопасности пищевых продуктов необходим постоянный контроль и оценка рисков на всех этапах обработки.

Контроль качества продукции на перерабатывающих предприятиях ГК «Черкизово» достигается системой менеджмента безопасности пищевой продукции (СМБПП), которая подтверждена сертификатом соответствия, выданным в рамках схемы FSSC 22000. СМБПП внедрена на птицеперерабатывающем комплексе АО «Куриное Царство» филиал «Узловская птицефабрика» (Пашково, Россия) с 2015 г., с августа 2024 г. действует ее новая версия v.6.0 [2].

Цель исследования – оценить объективность методов антимикробной интервенции (обработки) на технологических этапах производства и проверить соответствие оборудования для замораживания и хранения продукции из мяса птицы микробиологическим требованиям.

Объекты и методы исследования

Объекты исследования – микробиологические риски на технологической линии переработки цыплят-бройлеров на предприятии АО «Куриное Царство» филиал «Узловская птицефабрика» (Пашково, Россия). Исследование охватывало этапы антимикробной обработки тушек в спрей-кабине после воздушно-капельного охлаждения, а также производство, упаковку тушек, полуфабрикатов разделки, субпродуктов, их замораживание и временное хранение.

Методологическую основу составляли принципы ХАССП и действующие требования системы менеджмента безопасности пищевой продукции (схема сертификации FSSC 22000 версии 6.0). Валидацию проводили путем отбора проб и микробиологического анализа в аккредитованной лаборатории.

Отбор проб для контроля антимикробной интервенции осуществляли на ключевых контрольных точках: после эвтаназии, после снятия пера (до дип-танка), после обработки в дип-танке с раствором надуксусной кислоты (0,05 % или 500 ppm), после ручного потрошения и обработки в спрей-кабине.

Контроль работы холодильного и морозильного оборудования (камера шоковой заморозки) проводили по показателям времени и температуры промерзания продукции. После успешной валидации работы оборудования (оценка функционирования и эксплуатации) выполняли проверку процесса замораживания: установка параметров заморозки (до -12°C в толще продукта); контроль температуры каждые 60 мин; фиксация общего времени заморозки и микробиологический анализ до и после замораживания.

При проведении оценки биологических рисков определяли показатели КМАФАнМ, наличие *Salmonella* spp. и *Listeria monocytogenes*. Расчет уровня рисков осуществляли по утвержденной на предприятии методике на основе показателей тяжести и вероятности.

Результаты и их обсуждение

На предприятиях группы компаний (ГК) «Черкизово» (Москва, Россия) существует группа обеспечения безопасности пищевых продуктов (ГОБПП), утвержденная приказом руководителя предприятия. Функции ГОБПП заключаются в обеспечении безопасности продукции на всех этапах ее производства в соответствии с принципами ХАССП. Следовательно, сотрудники, включенные в состав ГОБПП, должны обладать знаниями о полном цикле производственного процесса, технологических аспектах производства и производимом пищевом продукте, а также иметь опыт в специализированных и смежных областях, включая навыки работы с мониторинговым и измерительным оборудованием, знания в ветеринарии и микробиологии, компетенции в области законодательства, нормативных и технических документов на продукцию и др.

АО «Куриное Царство» филиал «Узловская птицефабрика» (Пашково, Россия) – птицеперерабатывающий комплекс, занимающийся производством и реализацией продукции переработки курицы от убоя цыпленка-бройлера, обескровливания, ощипывания (удаления пера), потрошения, охлаждения до выпуска готовой продукции: тушек (в соответствии с требованиями ГОСТ 31962-2013 и СТО 79323491-003-2023); субпродуктов (печень, сердце, желудки и др.); частей цыпленка-бройлера (головы, шеи, бедро, голень и т. д.), а также наборов для шашлыка и чахохбили в соответствии с требованиями СТО 79323491-003-2023.

В соответствии с анализом, касающимся опасных факторов на этапах производства продукции установлено, что химические риски, такие как наличие антибиотиков и присутствие кокцидиостатиков, можно выявить на этапе приема птицы. Количество антибиотиков, содержащихся в продуктах убоя и мясе птиц,

регламентируется в рамках ТР ТС 021/2011 «О безопасности пищевой продукции».

Ветеринарно-санитарный контроль на этапах приемки сырья включает в себя обнаружение остаточных количеств ветеринарных препаратов и разработку способов технологической обработки для снижения контаминации, т. к. длительное употребление человеком в пищу мяса птиц с остаточным содержанием антибиотиков, а также кокцидиостатиков, может привести к побочным эффектам, в частности вызвать аллергию, дисбактериоз и снижение иммунитета. Термическая обработка мяса на производстве позволяет снизить количество антибиотиков, однако антибиотики тетрациклинового ряда и кокцидиостатики устойчивы к действию высоких температур [9, 10].

В соответствии с планом ХАССП КЦУ, на предприятии существует операционная программа предварительных условий, обеспечивающая контроль за точками приема по опасным факторам при производстве продукции. Контроль доставки птицы осуществляется по каждой партии, поступающей на предприятие. Ответственное лицо – ветеринарно-санитарный врач. Результаты фиксируются в «Журнале учета и регистрации приема птицы на убой». В случае несоблюдения сроков выведения препарата информацию передают главному ветеринарно-санитарному врачу, технологу предприятия, руководителям отдела качества и внутреннего контроля. При этом продукцию замораживают, направляют в аккредитованную лабораторию на исследование, а также блокируют всю продукцию с данного птичника. По результатам формируют протоколы исследований и составляют «Отчет о несоответствии».

Ветеринарно-санитарную экспертизу проводят на этапе первичной обработки птицы. Оценивают субпродукты каждой тушки на наличие патологических изменений (перигепатиты, перикардиты, перитониты, гепатозы и истощение живой птицы) – биологических рисков. По результатам производят отбраковку тушек с признаками патологических изменений. Ответственное лицо – государственный ветеринарный врач. Документ для фиксации информации – «Журнал учета результатов ветеринарно-санитарной экспертизы тушек птицы в убойном цехе птицеводческого хозяйства (форма № 9-вет. Оперотчет)». Массовые случаи наличия патологических изменений фиксируют в «Журнале учета и регистрации приема птицы на убой» и повторяют процедуру блокировки продукции.

На этапе доохлаждения тушек, частей тушек и субпродуктов обеспечивают контроль: время доохлаждения – не более 4 ч; температура продукции после доохлаждения – не выше +4 °С; температура в камере доохлаждения – от –2 до +2 °С. Контроль осуществляют каждые 2 ч. Ответственное лицо – кладовщик или мастер убойного отдела. В случае превышения времени охлаждения продукции ее направляют на замораживание и блокируют с последующей отправкой на исследование в аккредитованную лабораторию. Регламенты

временного хранения охлажденной продукции: тушки и части тушек – не более 48 ч; кости и субпродукты – не более 24 ч; температура продукции не выше +4 °С; температура в камере до охлаждения – от –2 до +2 °С.

На этапе формирования партии для замораживания контролируют время формирования партии: тушки и части тушек – не более 48 ч; кости и субпродукты – не более 24 ч. В случае превышения времени охлаждения продукции ее направляют на замораживание и блокируют с последующей отправкой на исследование в аккредитованную лабораторию. Решение по результатам испытаний принимает уполномоченное лицо. Соответствующую информацию заносят в 100-КЦУ-ППК-УО-013 «Журнал контроля температуры в камерах и температуры продукции при доохлаждении» и КЦУ.УО.Ж-001 «Журнал временного хранения сырья для замораживания». Аналогичная процедура действует при замораживании: контроль времени замораживания – не менее 2 циклов по 10 ч. В случае превышения времени замораживания продукцию дозамораживают до соответствующей температуры или направляют на повторное замораживание и блокируют. Информацию о процедуре вносят в журналы КЦУ.УО.Ж-002-01 «Журнал контроля замораживания продукции в камере 7 Б» или КЦУ.УО.Ж-002-02 «Журнал контроля замораживания продукции в камере 7 А». Временное хранение замороженной продукции в рефконтейнерах предусматривает контроль температуры в толще продукции: при отгрузке – не выше –12 °С, для экспорта – не выше –15 °С. Температура в рефконтейнерах должна быть не выше –18 °С.

Определение тяжести того или иного опасного фактора происходит в соответствии с методическими рекомендациями, утвержденными на предприятиях ГК «Черкизово». Согласно анализу рисков для сырья (рис. 1, табл. 1), наличие остатков ветеринарных препаратов и патологических изменений субпродуктов тушек относят к высокому уровню риска (8 баллов), а контаминацию микроорганизмами и их развитие при нарушении режима обработки – к значительным рискам (6 баллов, средний уровень).

Как следует из требований системы менеджмента безопасности пищевой продукции (СМБПП) и методических рекомендаций предприятий ГК «Черкизово», все идентифицированные значительные опасности должны управляться одиночными или комплексными мерами контроля, которые способны предотвратить, исключить или снизить опасность до приемлемого уровня.

При внедрении на предприятие процедур контроля и их изменений проводят валидацию для подтверждения, что выбранные меры контроля способны достичь планируемого результата [2, 3, 11]. Результативность выбранных мер контроля должна быть проверена и подтверждена не менее чем на трех производственных партиях готового продукта. Если результативность не подтверждена, ГОБПП должна изменить меры контроля, а затем провести валидацию вновь.

			Вероятность				
			Мало-вероятно	Редко, возможно, но случаев не было	Возможно, случай был отмечен за год	Вероятно, зафиксированы несколько случаев в году	Часто, от 1 случая в месяц и чаще
			1	2	3	4	5
Серьезность	Может вызвать летальный исход	5	6	7	8	9	10
	Может вызвать серьезное заболевание	4	5	6	7	8	9
	Может вызвать заболевание	3	4	5	6	7	8
	Может вызвать недомогание	2	3	4	5	6	7
	Почти незначительна (не оказывает влияние на здоровье, но оказывает моральный ущерб для потребителя)	1	2	3	4	5	6
			Низкий	Средний	Высокий		

Рисунок 1. Диаграмма анализа рисков для сырья

Figure 1. Risk analysis for raw materials

Таблица 1. Оценка идентифицированных опасных факторов, результаты выбора и оценка мер контроля

Table 1. Hazards, selection, and control measures

№	Операция / сырье	Фактор	Источник	Тяжесть	Вероятность	Уровень	Результат
Точка приема № 3. Приемка птицы							
3.1	Доставка птицы	Антибиотики, кокцидиостатики (химический)	Кормопроизводство	4	4	> 8 (высокий)	Операционная программа предварительных условий № 1
Точка приема № 4.1. Первичная обработка, потрошение							
4.1.11.1	Ветеринарно-санитарная экспертиза	Патологические изменения (перигепатиты, перикардиты и др.) (биологический)	Внутренние органы цыпленка-бройлера	3	5	> 8 (высокий)	Операционная программа предварительных условий № 2
Точка приема № 4.2. Охлаждение и сортировка							
4.2.7	Дезинфекция тушек. Концентрация раствора надуксусной кислоты – не ниже 500 ppm	КМАФАнМ, БГКП (биологический)	Кормопроизводство	4	4	> 8 (высокий)	Операционная программа предварительных условий № 3
		Salmonella (биологический)	Контаминация	4	2	6 (значительный)	Операционная программа предварительных условий № 3
		Listeria monocytogenes (биологический)	Контаминация	4	2	6 (значительный)	Операционная программа предварительных условий № 3
Точка приема № 5. Производство и упаковка тушки Точка приема № 6. Производство и упаковка полуфабрикатов разделки Точка приема № 10. Производство и упаковка субпродуктов							
5.9 6.13 10.13	Доохлаждение тушек, частей тушек, субпродуктов. Температура воздуха в камере от –2 до +2 °С, в толще продукта –не выше +4°С, не более 4 ч	КМАФАнМ, БГКП (биологический)	Развитие микроорганизмов при превышении времени доохлаждения и несоответствии температуры продукции	2	4	6 (значительный)	Операционная программа предварительных условий № 4
		Salmonella (биологический)	Развитие микроорганизмов при превышении времени доохлаждения и несоответствии температуры продукции	4	2	6 (значительный)	Операционная программа предварительных условий № 4

Продолжение таблицы 1

№	Операция / сырье	Фактор	Источник	Тяжесть	Вероятность	Уровень	Результат
5.5 6.8 10.8	Формирование партии для замораживания	КМАФАнМ, БГКП (биологический)	Развитие микроорганизмов при превышении времени доохлаждения и несоответствии температуры продукции	2	4	6 (значительный)	Операционная программа предварительных условий № 5
		Salmonella (биологический)	Развитие микроорганизмов при превышении времени доохлаждения и несоответствии температуры продукции	4	2	6 (значительный)	Операционная программа предварительных условий № 5
5.6 6.9 10.9	Замораживание	КМАФАнМ, БГКП (биологический)	Развитие микроорганизмов при превышении времени доохлаждения и несоответствии температуры продукции	2	4	6 (значительный)	Операционная программа предварительных условий № 6
		Salmonella (биологический)	Развитие микроорганизмов при превышении времени доохлаждения и несоответствии температуры продукции	4	2	6 (значительный)	Операционная программа предварительных условий № 6
6.2.1.1, 6.3.2.1	Дезинфекция частей тушек	КМАФАнМ, БГКП (биологический)	Контаминация, развитие микроорганизмов при превышении времени доохлаждения и несоответствии температуры продукции	2	4	6 (значительный)	Операционная программа предварительных условий № 7
		Salmonella (биологический)	Контаминация, развитие микроорганизмов при превышении времени доохлаждения и несоответствии температуры продукции	4	2	6 (значительный)	Операционная программа предварительных условий № 7
Точка приема № 11. Временное хранение готовой продукции							
11.2	Временное хранение замороженной продукции в рефконтейнерах	КМАФАнМ, БГКП (биологический)	Контаминация, развитие микроорганизмов при превышении времени доохлаждения и несоответствии температуры продукции	2	4	6 (значительный)	Операционная программа предварительных условий № 8
		Salmonella (биологический)	Контаминация, развитие микроорганизмов при превышении времени доохлаждения и несоответствии температуры продукции	4	2	6 (значительный)	Операционная программа предварительных условий № 8
11.3	Временное хранение охлажденной продукции	КМАФАнМ, БГКП (биологический)	Контаминация, развитие микроорганизмов при превышении времени доохлаждения и несоответствии температуры продукции	2	4	6 (значительный)	Операционная программа предварительных условий № 9

Информация по процедуре сохраняется в документах (протоколы валидации, протоколы лабораторных исследований и т. д.).

Валидация методов испытаний – это установление правильности и достоверности метода на основе проведения серии экспериментов и оценки результатов [3, 12]. Согласно плану ХАССП, на предприятии проводят валидацию не реже одного раза в год, по некоторым мероприятиям – один раз в три года, а также еженедельную верификацию, которая должна подтверждать, что меры контроля остаются результативными, а установленный при валидации приемлемый уровень пищевой безопасности не повышается. Верификацию не должны осуществлять те же сотрудники, которые проводят мониторинг параметров [13]. Данный подход позволяет обеспечить результативность выбранных мероприятий и безопасность выпускаемой продукции в соответствии с требованиями нормативных документов.

Валидация антимикробной интервенции проведена в соответствии с требованиями СМБПП, внедренной на предприятии. Назначение – оценка эффективности работы точек антимикробных интервенций на технологических этапах от поступления птицы на завод до спрей-кабины после воздушно-капельного охлаждения.

Для каждой точки приемки разработаны предупреждающие меры и меры контроля [3, 11, 14], прописанные в документации процедур ХАССП: КЦУ.СПК-001 «Спецификация. Птица сельскохозяйственная для убои»; КЦУ.ВСО.И-003 «Инструкция по проведению ветеринарно-санитарной экспертизы. Отбраковка»; КЦУ.СОП-30-083 «Стандартные операционные процедуры по контролю доохлаждения продукции»; КЦУ.УО.И-001 «Инструкция. Замораживание»; УК.Р-30-001 «Регламент по убою птицы. Входной контроль документации»; ГЧ.ДК.П-002 «Личная гигиена персонала»; ГЧ.ДК.П-007 «Использование Оксония Актив»; «Инструкция по оценке эффективно-

сти спрей-кабинетов»: ГЧ.ДК.П-011 «Управление несоответствующей продукцией»; «Журнал учета результатов ветеринарно-санитарной экспертизы тушек птицы в убойном цехе птицеводческого хозяйства (форма № 9-вет. Оперотчет)»; «Перечень ветпрепаратов для цыпленка-бройлера; накладная, журнал учета, система «Меркурий» и др.

Проведенный анализ опасных факторов на технологической линии переработки цыплят-бройлеров выявил четкое распределение рисков, требующее дифференцированного подхода к управлению. Наиболее высокий уровень риска (более 8 баллов) связан с химическими опасностями на этапе приемки птицы (остатки ветеринарных препаратов) и биологическими опасностями на этапе первичной обработки (патологические изменения внутренних органов). Эти точки требуют безусловного приоритета и жесткого контроля через операционные программы предварительных условий № 1 и 2). Значительные риски (уровень 6) повсеместно связаны с микробиологической контаминацией (КМАФАнМ, БГКП, *Salmonella* spp. и *Listeria monocytogenes*) на этапах охлаждения, замораживания и хранения. Их источником, как правило, является развитие микрофлоры при нарушении установленных временных и температурных режимов. Управление этими рисками, также регламентированное соответствующими операционными программами предварительных условий, служит основой для обеспечения стабильной микробиологической безопасности готовой продукции. Полученная карта рисков представляет собой научно обоснованный фундамент для эффективного распределения ресурсов контроля и дальнейшей оптимизации системы ХАССП на предприятии.

На производстве проводят антимикробную интервенцию раствором надуксусной кислоты тушек и частей тушек после разделки. Результаты микробиологической оценки бактериальной обсемененности на этапах обработки представлены на рисунке 2.

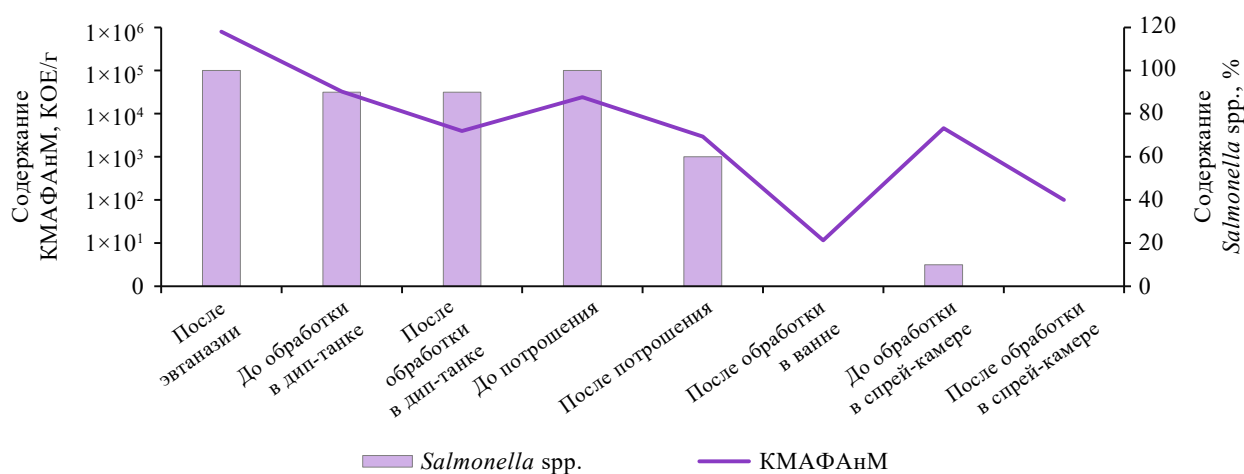


Рисунок 2. Содержание КМАФАнМ и *Salmonella* spp., после обработки целой тушки

Figure 2. Content of QMAFAnM and *Salmonella* spp., after chicken processing

Общее микробное число после эвтаназии составило $8,0 \times 10^5$ КОЕ/г. После снятия пера (до обработки в дип-танке) этот показатель снижался до $3,3 \times 10^4$ КОЕ/г. Содержание *Salmonella* spp. обнаружено в 100 % тушек после эвтаназии и снизилось до 90 % после снятия пера. Обработка в дип-танке в растворе надуксусной кислоты концентрацией 500 ppm (0,05 %) уменьшила общее количество микроорганизмов до $4,0 \times 10^3$ КОЕ/г, при этом процент тушек с *Salmonella* spp. не изменился. После ручного потрошения вследствие загрязнения поверхности тушек желчью, кровью и частицами внутренних органов происходило повторное обсеменение, что сопровождалось увеличением КМАФАнМ до $2,4 \times 10^4$ КОЕ/г и повышением доли положительных проб по *Salmonella* spp. до 100 % (рис. 3). Окончательное снижение показателей КМАФАнМ и *Salmonella* spp. происходило после разделки тушки и орошении в спрей-камере. Согласно исследованиям в убойных цехах, наибольшая микробная контаминация поверхности тушек происходила на этапе потрошения. После обработки в дип-танке и последующего охлаждения в ванне показатели КМАФАнМ и *Salmonella* spp. на поверхности тушек снизились до $1,2 \times 10^1$ КОЕ/г и 0 % соответственно.

Микробиологическая обсемененность обработанных тушек зависит от различных факторов: однородности партии поступающей птицы, корректности работы всех модулей на участке, соблюдения ветеринарных требований и культуры производства. Однако полностью обеспечить стерильность на этапах первичной обработки невозможно [15, 16].

Возможный рост бактериальной обсемененности, в т. ч. *Salmonella* spp., на этапе разделки связан с недостаточной антисептической дезинфекцией перчаток у рабочих и санитарной обработкой оборудования после охлаждения субпродуктов. В связи с этим необходимо внести изменения в процедуру микробной очистки: наладить работу потрошения так, чтобы после данного этапа поверхность тушек оставалась чистой; внедрить регулярную обработку перчаток рабочих, одновременно организовав на регулярной

основе отбор смывов на патогены с перчаток и скорректировав режим обработки по результатам смывов; увеличить концентрацию надуксусной кислоты в спрей-кабине после воздушно-капельного охлаждения до 700 ppm, провести верификацию, а также повторить валидацию с учетом новых условий.

Микробиологическая контаминация продукции возможна не только при убое птицы и ее первичной обработке, но и во время технологического процесса, хранения и транспортировки. Необходимо создать условия, предотвращающие возникновение патогенных микроорганизмов [17].

Процессы охлаждения и замораживания продукции вызывают снижение активности ферментов микроорганизмов, тем самым прекращая их рост, что позволяет избежать обсеменения готовой продукции и обеспечивает ее биологическую безопасность. Следовательно, регулярные процедуры проверки работы оборудования на этапах производства гарантируют безопасность и качество продукции [18].

Валидацию охлаждения и замораживания проводят для каждого вида продукции, подвергаемой охлаждению или замораживанию. Она может быть распространена на группу аналогичной продукции, схожей по морфологическим свойствам, размеру, начальной температуре, влажности, типу упаковки и т. п.

Валидация холодильного и морозильного оборудования, расположенного в цехе переработки птицы, проведена по показателям функционирования (наличие и корректность инструкций, исправность систем управления и безопасности, работоспособность аварийной сигнализации, герметичность и сохранение температуры при аварии) и проверки эксплуатации (температурное картирование камеры, анализ равномерности распределения температуры, процесс замораживания и др.).

Валидацию оборудования осуществляли с определением наличия стандартных операционных процедур по работе с оборудованием. На предприятии используют скороморозильную камеру 7 А (табл. 2). В наличии имеются КЦУ.УО.И-001 «Инструкция по производству замороженной продукции» и КЦУ.ИТС.РИ-006 «Рабочая инструкция. Требования к техническому обслуживанию, ремонту оборудования, мониторингу средств измерения». Данная модель исключает возможность внесения корректировок в установленные параметры не авторизованным персоналом. Согласно результатам проверки этапов 1.1 (функционирование) и 1.2 (эксплуатация) установлено, что корректность составления стандартных операционных процедур и рабочей документации, соответствие требованиям компании обеспечены, а скороморозильная камера функционирует эффективно, что позволяет пройти заключительную валидацию процесса замораживания и временного хранения.

Валидацию процесса заморозки и временного хранения продукции проводили после успешной проверки работы оборудования по следующим видам



Рисунок 3. Состояние тушек после потрошения

Figure 3. Carcasses after evisceration

Таблица 2. Валидация холодильного и морозильного оборудования

Table 2. Validation of refrigeration and freezing equipment

Функционирование оборудования		Эксплуатация скороморозильной камеры	
Параметр	Описание	Параметр	Значение
Место установки	Цех переработки птицы (АО «Куриное Царство филиал «Узловская Птицефабрика»)	Сезон года	Осень
Предназначение	Создание и поддержание требуемых температурных режимов	Температура воздуха на улице	от +4 до +6 °С
Модель	Скороморозильная камера 7 А	Температура и влажность воздуха в помещении (где расположен вход в камеру)	6–8 °С
Система управления	Электронный управляющий блок АКС 116А (Danfoss, Дания)		
Температура	t = –38–40 °С	Стабильность работы камеры	Стабильно
Хладагент	Фреон-22		
Размер охлаждаемого помещения	5,6×14,0×3,5 м		
Температура воздуха в помещении	–35 °С		
Продукт	Птица		
Температура поступающего продукта	+4 °С		
Конечная температура продукта	–12 °С		
Количество одновременно загружаемого продукта	10 т		
Установленные параметры	–32 °С	Температурное картирование камеры	Размеры помещений 14000×6000×3300 м
Описание системы контроля работоспособности	Информация с датчиков температуры выведена на шкаф управления, установленный в машинном отделении компрессорного цеха. Продолжительность замораживания – два цикла по 10 ч, в промежутке – оттаивание	«Холодные» и «горячие» точки камеры	Горячая точка камеры – 1 метр от входа, ряд возле стены, противоположной от охладителей Холодная точка камеры – ряд возле охладителей
Описание аварийной системы	При задымлении машинного отделения компрессорного цеха приходит сигнал на пульт газоаналитической системы СКВА-1. Действия сотрудников согласно ПЛАС	Определение однородности распределения температуры в камере	Однородная
Время сохранения температуры при возникновении аварийной ситуации	6 ч	Контроль функционирования системы непрерывного мониторинга температуры	Датчики температуры РТ 1000(Danfoss). Каждые 2 ч производится фиксация режимов работы оборудования камеры шоковой заморозки в суточном журнале АХУ
Допустимое время открывания дверей (без критического влияния на продукцию)	10 мин		
Динамическое распределения температуры во время открывания двери	После полного заполнения (10 т) происходит включение камеры. В процессе заморозки двери в камеру не открываются. Открываются по окончании процесса заморозки	Определение (подтверждение) точек системы непрерывного мониторинга	Производится проверка и калибровка датчиков в соответствии с КЦУ ИТС. РИ-006 «Рабочая инструкция. Требования к техническому обслуживанию, ремонту оборудования, мониторингу средств измерения»

Таблица 3. Валидация процесса хранения и заморозки продукции

Table 3. Validation of product storage and freezing process

Требование (регламент КЦУ.УО.И-001)	Продукция			
	Тушка цыпленка-бройлера	Филе без кожи	Крыло (целое)	Печень
Описание схемы охлаждения и заморозки	до -12°C в толще продукта			
Температура продукции в начале охлаждения и заморозки, $^{\circ}\text{C}$	0,3	0,0	0,0	0,1
Температура продукции в конце охлаждения и заморозки, $^{\circ}\text{C}$	$-14,9$	$-15,1$	$-14,5$	$-13,3$
Общее время охлаждения и заморозки, ч	21,0	21,0	21,0	21,0
Объем загруженности камеры, % от нормируемой	100,0	100,0	100,0	100,0

продукции: тушка цыпленка-бройлера, филе без кожи, крыло (целое), печень. Условия заморозки и хранения: температура не выше -18°C , используемое оборудование – камера шоковой заморозки с температурным режимом от -25 до -40°C .

Проверку температуры продукции до и после замораживания выполняли проверенным термометром в течении всего времени проведения валидации. Интервалы проведения замеров не превышали 60 мин. Измерение температуры после замораживания выполняли в продукции, расположенной в «теплых» точках камеры или максимально близко к ним (табл. 3).

Результаты валидации процесса заморозки четырех основных видов продукции (тушка, филе, крыло, печень) подтверждают общую эффективность и соответствие установленным требованиям. При 100 % загрузке камеры конечная температура продукции в толще достигает значений от $-13,3$ до $-15,1^{\circ}\text{C}$, что соотносится с нормативом (не выше -12°C). Общее время процесса (21 ч, включая процесс оттаивания) является технологически обоснованным и достаточным для достижения заданных параметров даже для продукции с разной морфологией (печень, тушка). Полученные данные свидетельствуют о равномерности процесса заморозки в валидированной камере и отсутствии значительных «тепловых» зон, негативно влияющих на качество и безопасность. Это подтверждает, что установленный регламент (КЦУ.УО.И-001) является адекватным и при его строгом соблюдении процесс замораживания надежно останавливает развитие микрофлоры, выполняя свою ключевую функцию в обеспечении биологической безопасности продукции. Результаты микробиологических исследований по охлажденной и замороженной продукции представлены в таблице 4.

Установлено, что показатели КМАФАнМ для всех протестированных продуктов (тушка, печень, филе грудки, крыло) после заморозки остаются в пределах нормы ($5,0 \times 10^5$ КОЕ/г), установленной техническими регламентами. Это доказывает, что сам процесс замораживания, валидированный ранее, эффективно сдерживает рост микроорганизмов. Однако в отдель-

Таблица 4. Показатели микробиологического исследования охлажденной и замороженной продукции

Table 4. Microbiological examination of chilled and frozen products

Продукция	Результаты испытаний	
	На 4-е сутки охлаждения (фон)	По окончании процесса заморозки
Тушка КЦ НП	$1,0 \times 10^2$	$1,6 \times 10^3$
Тушка КЦ НП	$1,0 \times 10^2$	$3,3 \times 10^2$
Тушка КЦ НП	$7,1 \times 10^2$	$1,0 \times 10^5$
Печень	$2,2 \times 10^4$	$8,3 \times 10^3$
Печень	$3,3 \times 10^3$	$4,3 \times 10^4$
Печень	$1,3 \times 10^4$	$1,0 \times 10^5$
Филе грудки	$3,3 \times 10^2$	$1,0 \times 10^2$
Филе грудки	$2,1 \times 10^2$	$2,1 \times 10^2$
Филе грудки	$4,4 \times 10^2$	$4,3 \times 10^2$
Крыло	$2,2 \times 10^4$	$4,6 \times 10^5$
Крыло	$3,1 \times 10^4$	$1,0 \times 10^5$
Крыло	$3,9 \times 10^4$	$3,0 \times 10^5$

ных образцах (например крыло, печень) наблюдается увеличение КМАФАнМ после заморозки по сравнению с фоновыми показателями на 4-е сутки охлаждения. Это косвенно указывает на неравномерность исходной микробиологической нагрузки или на возможные очаги перекрестной контаминации перед этапом заморозки. Таким образом, хотя конечный продукт соответствует нормативам, для дальнейшего снижения микробиологических рисков необходимо усилить контроль на предшествующих этапах – охлаждения и временного хранения сырья, чтобы минимизировать исходный уровень обсемененности, поступающей на замораживание.

Выводы

Проведенное исследование на производственных мощностях АО «Куриное Царство» группы компаний «Черкизово» (Москва, Россия) позволило комплексно оценить эффективность системы обеспечения микробиологической безопасности в рамках действующей системы менеджмента безопасности пищевой про-

дукции, сертифицированной по FSSC 22000 v.6.0. Внедренные процессы и процедуры обеспечивают выпуск продукции, соответствующей установленным нормативным требованиям. Успешно проведена валидация основных контрольных мер: подтверждена эффективность антимикробной интервенции раствором надуксусной кислоты на технологических этапах, а также корректная работа холодильного и морозильного оборудования, гарантирующая достижение и поддержание необходимых температурных режимов. Выявлены наиболее уязвимые звенья технологической цепи. Этап ручного потрошения идентифицирован как критическая точка, где происходит значительное вторичное обсеменение тушек с ростом КМАФАнМ и частоты обнаружения *Salmonella* spp. до 100 %. Предложен комплекс корректирующих действий: оптимизация режима дезинфекции на финальном этапе за счет увеличения концентрации надуксусной кислоты в спрей-кабине до 700 ppm, внедрение регулярного микробиологического мониторинга смывов с поверхностей оборудования и рук персонала, ужесточение контроля временных и температурных параметров на этапах промежуточного

хранения сырья. Последующая верификация и повторная валидация этих мероприятий позволят завершить цикл постоянного улучшения системы обеспечения микробиологической безопасности. Реализация предложенных рекомендаций минимизирует микробиологические риски.

Критерии авторства

Авторы в равной степени участвовали в подготовке и написании статьи.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution

All the authors contributed equally involved in the research and design of the manuscript.

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest regarding the publication of this article.

Список литературы / Reference

1. Бондарева О. М., Ефимова Г. В. Валидация и верификация в основе реализации принципов HACCP. Стандарты и качество. 2022. № 2. С. 100–103. [Bondareva OM, Efimova GV. Validation and verification in the implementation of HACCP principles. Standards and Quality. 2022;(2):100–103. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/LZINGN>
2. Галина У. А., Кульмакова Н. И., Ксенофонтова А. А. Анализ рисков и критические контрольные точки в системе HACCP. Вестник Чувашского государственного аграрного университета. 2025. № 2. С. 74–80. [Galina UA, Kulmakova NI, Ksenofontova AA. Hazard analysis and critical control points in HACCP system. Vestnik Chuvash State Agrarian University. 2025;(2):74–80. (In Russ.)] <https://doi.org/10.48612/vch/9r9b-dd65-ermn>
3. Игонина И. Н. Роль управленческих функций в системе менеджмента безопасности пищевой продукции. Пищевая промышленность. 2024. № 8. С. 115–117. [Igonina IN. The role of managerial functions in the food safety management system. Food Industry. 2024;(8):115–117. (In Russ.)] <https://doi.org/10.52653/PPI.2024.8.8.022>
4. Кальницкая О. И. Влияние параметров термической обработки мяса на уменьшение в нем остатков антибиотиков. Ветеринарная патология. 2008. № 2. С. 73–75. [Kalnitskaya OI. Influence of parameters of heat treatment of meat on reduction of antibiotic residues in it. Russian Journal of Veterinary Pathology. 2008;(2):73–75. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/OEDTAJ>
5. Кузнецова О. А., Юрчак З. А., Мельник К. О. Разработка и внедрение системы HACCP в соответствии с требованиями ТРТС 021/2011 и ГОСТ Р 51705.1. Пищевая промышленность. 2016. № 1. С. 34–36. [Kuznetsova OA, Yurchak ZA, Melnik KO. Development and implementation of the HACCP system in accordance with the requirements of TRTS 021/2011 and GOST R 51705.1. Food Industry. 2016;(1):34–36. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/VPSLYZ>
6. Мезенцев С. В. Система HACCP для предприятий по убою скота и птицы (наличие требований по *E. coli*). Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2014. № 10. С. 132–137. [Mezentsev SV. The HASSP system for cattle and poultry slaughtering companies (the requirements regarding *E. coli*). Bulletin of the Altai State Agrarian University. 2014;(10):132–137. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/SXRORP>
7. Мешков С. А., Рудый М. А., Доморацкий А. В. Валидация методов испытаний. Петербургский экономический журнал. 2024. № 3. С. 28–39. [Meshkov SA, Rudyu MA, Domoratski AV. Validation of test methods. St Petersburg Economic Journal. 2024;(3):28–39. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/CJMFUV>
8. Мешков С. А., Рудый М. А., Доморацкий А. В. Метрологическая прослеживаемость, как инструмент менеджмента качества в лаборатории. Петербургский экономический журнал. 2023. № 4. С. 21–32. [Meshkov SA, Rudyu MA, Domoratski AV. Metrological traceability as a quality management tool in the laboratory. St Petersburg Economic Journal. 2024;(3):28–39. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/THYJZW>
9. Нитяга И. М., Телегина С. А., Галушко Д. П. Мониторинг антибиотиков тетрациклиновой группы в мясе и мясопродуктах из птицы с целью предотвращения их загрязнения. Научные известия. 2022. № 26. С. 284–288. [Nityaga IM, Telegina SA, Galushko DP. Monitoring of antibiotics of the tetracycline group in meat and meat products from poultry in order to prevent their contamination. Scientific News. 2022;(26):284–288. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/VKAIYH>

10. Ильякова А. В., Гончар А. С., Еремеева Н. И., Демина Ю. В. Оценка эффективности санитарной обработки технологического оборудования на предприятии мясоперерабатывающей промышленности. *Гигиена и санитария*. 2024. Т. 103. № 7. С. 712–717. [Ilyakova AV, Gonchar AS, Eremeeva NI, Demina YV. Assessment of efficiency of sanitary treatment of technological equipment at meat processing industry enterprise. *Hygiene and Sanitation, Russian journal*. 2024;103(7):712–717. (In Russ.)] <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2024-103-7-712-717>
11. Станкевич С. В., Короносова В. С. Организация контроля качества на малых предприятиях согласно системе HACCP, как гарант безопасности производимой продукции. *Технология и товароведение инновационных пищевых продуктов*. 2022. № 2. С. 84–87. [Stankevich SV, Koronosova VS. The organization of quality control in small enterprises according to the HACCP system, as a guarantor of the safety of manufactured products. *Technology and Merchandising of the Innovative Foodstuff*. 2022;(2):84–87. (In Russ.)] <https://doi.org/10.33979/2219-8466-2022-73-2-84-87>
12. Трухина Г. М., Борисова Н. А., Микаилова О. М., Дрозд Н. А. Оценка микробиологических позиций эффективности способов охлаждения и замораживания готовой продукции для бортового питания. *Гигиена и санитария*. 2024. Т. 103. № 12. С. 1514–1520. [Trukhina GM, Borisova NA, Mikailova OM, Drozd NA. Evaluation of the efficiency of methods of cooling and freezing finished products for inflight catering from a microbiological standpoint. *Hygiene and Sanitation, Russian Journal*. 2024;103(12):1514–1520. (In Russ.)] <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2024-103-12-1514-1520>
13. Чернуха И. М., Кузнецова О. А. Оценка опасных факторов при внедрении системы управления безопасностью пищевой продукции, основанной на принципах HACCP. *Все о мясе*. 2010. № 1. С. 38–40. [Chernukha IM, Kuznetsova OA. Assessment of dangerous factors in the implementation of a food safety management system based on the principles of HACCP. *All About Meat*. 2010;(1):38–40. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/MJCTST>
14. Эльгер А. В., Мишура Л. Г. Внедрения принципов HACCP в систему менеджмента качества. *Экономика и предпринимательство*. 2024. № 8. С. 1269–1272. [Elger AV, Mishura LG. Introduction of HACCP principles into the quality management system. *Economics and Entrepreneurship*. 2024;(8):1269–1272. (In Russ.)] <https://doi.org/10.34925/EIP.2024.169.8.235>
15. Antunović B, Blagojević B, Johler S, Guldemann C, Vieira-Pinto M, *et al.* Challenges and opportunities in the implementation of new meat inspection systems in Europe. *Trends in Food Science & Technology*. 2021;116:460–467. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.08.002>
16. De Vries H. The role of food science and technology in the future partnership sustainable food systems. *Trends in Food Science & Technology*. 2023;131:28–30. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2022.11.019>
17. Roasto M, Bonardi S, Mäesaar M, Alban L, Gomes-Neves E, *et al.* *Salmonella enterica* prevalence, serotype diversity, antimicrobial resistance and control in the European pork production chain. *Trends in Food Science & Technology*. 2023;131:210–219. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2022.12.007>
18. Shi X, Zhang X, A R, Wang T, Zhang J, *et al.* Current status and frontier tracking of the China HACCP system. *Frontiers in Nutrition*. 2023;10:1072981. <https://doi.org/10.3389/fnut.2023.1072981>

Дополнительная информация об авторах / Additional information about the authors

Чурышева Анна Андреевна / Anna A. Churyшева eLIBRARY SPIN 8950-4719

Сухинина Татьяна Вячеславовна / Tatyana V. Sukhinina ORCID 0000-0002-6130-8960; eLIBRARY SPIN 8486-8160

Есепенок Константин Викторович / Konstantin V. Esepenok ORCID 0000-0002-3085-6577; eLIBRARY SPIN 9202-4435

FOR AUTHORS

Food Processing: Techniques and Technology reports pioneering research in the food industry and all branches of agricultural science. We publish scientific papers, reviews, and brief scientific reports in such spheres of food science as food systems, biotechnology, food production technology, sanitation and hygiene, ecology, biosafety, zootechnics, agro-industrial machinery, etc.

Before submitting your manuscript, please make sure you have not submitted it elsewhere. Your research topic should correspond to the profile of the Journal and be relevant for the scientific community.

First, we check if your manuscript complies with the Journal's profile and formatting. Then, we check it for unattributed borrowings from open sources (plagiarism) at antiplagiat.ru

After that, your manuscript undergoes a double-blind peer review by specialists appointed by the Editor-in-Chief or the Deputy Editor-in-Chief. The peer review can be conducted by the members of the Editorial Board or by acknowledged academic experts in the area of research who have recent publications on the related topic. To be published, a manuscript has to be recommended by two independent reviewers.

The Reviewers are notified about the manuscripts being the authors' private owner rights that cannot be subject to public disclosure. The Reviewers are not allowed to copy them. Reviewing is strictly confidential. Violation of confidentiality is impossible unless the Reviewer reports unreliability or counterfeiting.

Usually, reviewing does not exceed three months from the day the Reviewer receives the manuscript.

All reviews are disposed of five years after the publication.

Based on the results, the Reviewer produces a reasoned opinion: the manuscript can be recommended for publication; the manuscript can be recommended for publication

after some improvement; the manuscript cannot be recommended for publication (reasons for rejection).

If the article underwent a considerable follow-on revision, it is again sent to the same Reviewer who gave the critical remarks.

We reserve the right to reject the manuscript if the Author is unable or unwilling to follow the recommendations.

In case of two negative initial reviews or one negative review on the revised variant, the manuscript is rejected without considering by other members of the Editorial Board.

The Author of the rejected article receives the reviews and a motivated refusal. The Reviewer's name may be reported to the Author provided that the former gives consent to it.

After reviewing, the Editor-in-Chief and the Editorial Board make the final decision.

All accepted articles require a publishing charge of 100,000 rubles per article, regardless of volume, language, graphic material, etc. Submission and peer review are free of charge, which means that you pay the article publishing charge only after you have received a positive review and your manuscript have been accepted for publication by the Editor-in-Chief. More information is available at fptt.ru/en

We are obliged to provide review copies to the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation upon request, but we do not retain rejected articles. Accepted manuscripts are not returned. The manuscripts with negative reviews are not published and not returned to the Author, either.

Manuscripts are usually published in the order we receive them. In exceptional cases, the Editorial Board maintains the right to change the order of publication.

All papers published in the *Food Processing: Techniques and Technology* fall under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).

FORMATTING

The article body should be 30,000–35,000 characters with spaces (abstract, figures, and tables included). Reviews have an unlimited wordage.

Format instructions:

- 20 mm margins;
- single line spacing without automatic hyphenation;
- no extra interspaces between words or gaps between paragraphs;
- Times New Roman, size 10;
- editable and colored Microsoft Office or Corel Draw figures and diagrams attached separately as tiff, jpeg, cdr, or excel files.

Please, do not overload your text with unnecessary formulae; do not illustrate the same results with both a table and a graph. Give each table or figure a header and a number, which you will use in the text to introduce them.

Structure:

1. Type of manuscript (research paper/review/report);
2. Title;
3. Initials and last names of the authors;
4. Affiliations;
5. Email of the author responsible for correspondence;
6. Abstract (Introduction; Study objects and methods; Results and discussion; Conclusions);
7. Keywords;
8. Funding;
9. Article body (Introduction; Study objects and methods; Results and discussion; Conclusions);

10. Contribution;
11. Conflict of Interest;
12. Acknowledgements;
13. References;
14. About the authors.

You can submit your manuscript and all accompanying documents on our site fptt.ru/en or email them to fptt98@gmail.com

Documents:

1. An MSWord e-version of your article named by the first author's last name (e.g., Smith.doc.);
2. A scanned PDF version of your article, the first page signed by all the authors (Smith.pdf.);
3. A scanned PDF version of a cover letter to the Chief Editor from your organization with the conclusion about the relevance of the research and recommendations for its publishing. It should contain the date, reference number, and the signature of the head of the organization;
4. A standard copyright agreement;
5. A consent to the Processing of Personal Data;
6. A consent to the Distribution of Personal Data;
7. A consent to the Cross-Border Transfer of Personal Data.

For more information, please, visit us at fptt.ru/en

ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ АВТОРОВ

Журнал «Техника и технология пищевых производств (Food Processing: Techniques and Technology)» предназначен для публикации статей, посвященных проблемам пищевой и смежных отраслей промышленности.

Статья должна отвечать профилю журнала, обладать научной новизной, публиковаться впервые.

Рукопись научной статьи, поступившая в редакцию журнала, рассматривается ответственным за выпуск на предмет соответствия профилю журнала и требованиям к оформлению, проверяется оригинальность представленного текста с помощью интернет-ресурса – <https://antiplagiat.ru>, регистрируется.

В журнале публикуются только рукописи, текст которых рекомендован рецензентами. Редакция организует «двухстороннее слепое» (анонимное) рецензирование представленных рукописей. Выбор рецензентов осуществляется решением главного редактора или его заместителя. Для проведения рецензирования рукописей статей в качестве рецензентов могут привлекаться как члены редколлегии журнала «Техника и технология пищевых производств (Food Processing: Techniques and Technology)», так и высококвалифицированные ученые и специалисты других организаций и предприятий, обладающие глубокими профессиональными знаниями и опытом работы по конкретному научному направлению, как правило, доктора наук, профессора. Все рецензенты являются признанными специалистами по тематике рецензируемых материалов и имеют в течение последних 3 лет публикации по тематике рецензируемой статьи.

Рецензенты уведомляются о том, что присланные им рукописи являются частной собственностью авторов и относятся к сведениям, не подлежащим разглашению. Рецензентам не разрешается делать копии статей для своих нужд. Рецензирование проводится конфиденциально. Нарушение конфиденциальности возможно только в случае заявления рецензента о недостоверности или фальсификации материалов, изложенных в статье.

Срок рассмотрения статьи не должен превышать трех месяцев со дня получения статьи на рецензирование.

Оригиналы рецензий хранятся в редакции издания в течение пяти лет со дня публикации статей. Если в рецензии имеется указание на необходимость исправления статьи, то она направляется автору на доработку. Если статья по рекомендации

рецензента подверглась значительной авторской переработке, то она направляется на повторное рецензирование тому же рецензенту, который сделал критические замечания. Редакция оставляет за собой право отклонения статей в случае неспособности или нежелания автора учесть пожелания редакции журнала.

При наличии отрицательных рецензий на рукопись от двух разных рецензентов или одной отрицательной рецензии на ее доработанный вариант статья отклоняется от публикации без рассмотрения другими членами редколлегии. Автору не принятой к публикации статьи ответственный за выпуск направляет мотивированный отказ. Фамилия рецензента может быть сообщена автору лишь с согласия рецензента.

Решение о возможности публикации после рецензирования принимается главным редактором, а при необходимости – редколлегией в целом.

Для публикации статей необходимо вносить плату (APC). Оплата производится только после получения положительных рецензий и утверждения главным редактором статьи в номер. За подачу рукописи статьи в редакцию журнала, ее проверку и рецензирование плата не взимается. Более подробно ознакомиться с условиями платы, скидками и привилегиями можно на <https://fppt.ru>

Редакция журнала направляет авторам представленных материалов копии рецензий или мотивированный отказ, а также обязуется направлять копии рецензий в Министерство науки и высшего образования Российской Федерации при поступлении в редакцию издания соответствующего запроса.

Редакция журнала «Техника и технология пищевых производств (Food Processing: Techniques and Technology)» не хранит рукописи, не принятые к печати.

Рукописи печатаются, как правило, в порядке очередности их поступления в редакцию. В исключительных случаях редакционная коллегия имеет право изменить очередность публикации статей.

Журнал «Техника и технология пищевых производств (Food Processing: Techniques and Technology)» является журналом открытого доступа (open access). Все материалы журнала распространяются на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЬИ

Объем статьи должен быть не менее 30–35 тыс. знаков (не включая списки литературы на русском и английском языках). Объем обзорной рукописи – более 35 тыс. знаков.

Оформление текста (форматирование): поля по 20 мм, одинарный интервал без переносов, лишние пробелы и абзацных интервалов, шрифт Times New Roman, 10 кегль. Следует избегать перегрузки статей большим количеством формул, дублирования одних и тех же результатов в таблицах и графиках.

Графики, диаграммы и т. п. (желательно цветные), созданные средствами Microsoft Office и Corel Draw, должны допускать возможность редактирования и направляются в редакцию отдельными файлами в форматах tiff, jpeg, cdr, excel.

Каждая таблица, график, диаграмма и т. п. должны иметь заголовки и порядковые номера, в тексте статьи должны присутствовать ссылки на каждую из них.

Структура статьи:

1. Тип статьи;
2. Название статьи;
3. Инициалы и фамилии всех авторов;
4. Официальное полное название учреждения;
5. E-mail автора, с которым следует вести переписку;
6. Аннотация (разбивается на разделы: «Введение», «Объекты и методы исследований», «Результаты и их обсуждение», «Выводы»);
7. Ключевые слова;
8. Финансирование;

9. Текст статьи (обязательные разделы: «Введение», «Объекты и методы исследований», «Результаты и их обсуждение», «Выводы»);

10. Критерии авторства;

11. Конфликт интересов;

12. Благодарности;

13. Список литературы;

14. References;

15. Сведения об авторах (на русском и английском языках).

Подать рукопись можно на сайте журнала <https://fppt.ru>, или отправив на e-mail fppt98@gmail.com

В редакцию предоставляются:

1. Электронная версия статьи в программе MSWord. Файл статьи следует назвать по фамилии первого автора – ПетровГП.doc.;
 2. Сканированная электронная версия статьи, подписанная всеми авторами, в формате pdf;
 3. Гарантийное письмо (скан-копия) на имя главного редактора журнала на бланке направляющей организации с указанием даты регистрации и исходящего номера, с заключением об актуальности работы и рекомендациями к опубликованию, с подписью руководителя учреждения;
 4. Издательский лицензионный договор;
 5. Согласие на обработку Персональных данных;
 6. Согласие на распространение Персональных данных;
 7. Согласие на трансграничную передачу Персональных данных.
- Более подробная информация на <https://fppt.ru>

СОДЕРЖАНИЕ

<i>Иванова С. А., Бабич О. О., Кригер О. В., Голубцова Ю. В., Вобликова Т. В.</i> Академик Александр Юрьевич Просеков (к 50-летию со дня рождения)	203	<i>Жигайлов А. С., Вечтомова Е. А., Козлова О. В., Верецагин А. Л.</i> Химический синтез наночастиц селена: исследование метода и перспектив его применения	317
<i>Барковская И. А., Муклетова Е. И., Агарков А. А., Рябова А. Е., Петров А. Н.</i> Гидролизат сывороточных белков, обогащенный йодом и цинком, как средство коррекции стресс-индуцированных йододефицитных состояний у мышей линии C57Bl/6N	221	<i>Алехина Н. Н., Антипова Л. В., Лобанов В. Г., Пономарева Е. И., Нартова В. Н.</i> Антипитательные факторы в растительном сырье и пути снижения их содержания	328
<i>Серазетдинова Ю. Р., Фотина Н. В., Тушкин А. Е., Любимова Н. А., Асякина Л. К.</i> Генетические детерминанты антагонистической и ростостимулирующей активности штамма <i>Pantoea pleuroti</i>	234	<i>Кишилова С. А., Леонова В. А., Митрова В. А., Семенова В. А., Пряничникова Н. С., Семиятний В. К., Рожкова И. В., Галстян А. Г.</i> Изучение свойств штаммов <i>Streptococcus thermophilus</i> и конструирование микробных консорциумов с их участием	342
<i>Александрочкин Д. И., Фоменко И. А., Детинкин И. А., Чернуха И. М., Машенцева Н. Г.</i> Оптимизация щелочной экстракции и изоэлектрического осаждения белка конопли для использования в пищевой промышленности	247	<i>Тамбаева Б. С., Кыдыралиев Н. А., Абакирова Э. М., Азисова М. А.</i> Разработка продуктов профилактической направленности из мяса яка	354
<i>Кутузов М. Н., Белова М. А., Новиченко О. В., Никитин И. А., Заруал Х., Вишняков В. С., Вилкова Д. Д.</i> Целевые и нецелевые методы оценки качества рыбного сырья: обзор на примере радужной форели	261	<i>Лобзанова М. Е., Юстратов В. П., Иванова С. А.</i> Исследование влияния глицина на термостабильность фолиевой кислоты в процессе хлебопечения	368
<i>Глухарев А. Ю., Кучина Ю. А., Деркач С. Р., Князева А. С., Утянов Д. А.</i> Изоляты белка из обезжиренной гороховой муки: получение и оценка качества	277	<i>Мерзлякова Н. В., Тихонов С. Л., Тихонова Н. В., Тимофеева М. С., Семин А. Н., Курдюмов А. В., Лылов А. С.</i> К вопросу о пероральной доставке биологически активных белковых молекул: проблемы и перспективы	380
<i>Голуб О. В., Захаренко А. М., Мотовилова Н. В., Мотовилов О. К., Голохваст К. С.</i> Влияние растительных полуфабрикатов и добавок на качество напитков	296	<i>Мальков Д. И., Сухих С. А., Каширских Е. В., Балашова К. А., Барзкар Н.</i> Структура, получение и применение фукоидана	402
		<i>Чурышева А. А., Сухинина Т. В., Есепенок К. В.</i> Валидация как инструмент системы менеджмента безопасности пищевой продукции птицеперерабатывающего производства	422

CONTENTS

<i>Ivanova S.A., Babich O.O., Kriger O.V., Golubtsova Yu.V., Voblikova T.V.</i> Academician of the Russian Academy of Sciences Alexander Yu. Prosekov: On His 50 th Birthday	204	<i>Zhigailov A.S., Vechtomova E.A., Kozlova O.V., Vereshchagin A.L.</i> Chemical Synthesis of Selenium Nanoparticles: Application Prospects	318
<i>Barkovskaya I. A., Mukletsova E.I., Agarkov A.A., Ryabova A.E., Petrov A.N.</i> Whey Protein Hydrolysate Fortified with Iodine and Zinc against Stress-Induced Iodine Deficiency in C57Bl/6N Mice	222	<i>Alekshina N.N., Antipova L.V., Lobanov V.G., Ponomareva E.I., Nartova V.N.</i> Anti-Nutritional Factors in Plant Raw Materials: Reduction Strategies	329
<i>Serazetdinova Yu.R., Fotina N.V., Tupikin A.E., Lyubimova N.A., Asyakina L. K.</i> Genetic Determinants of Antagonistic and Growth-Stimulating Activity of <i>Pantoea pleuroti</i>	235	<i>Kishilova S.A., Leonova V.A., Mitrova V.A., Semenova V.A., Pryanichnikova N.S., Semipyatniy V.K., Rozhkova I.V., Galstyan A.G.</i> <i>Streptococcus thermophilus</i> Strains: Properties and Microbial Consortia	343
<i>Aleksanochkin D.I., Fomenko I.A., Detinkin I.A., Chernukha I.M., Mashentseva N.G.</i> Hemp Protein in the Food Industry: Optimizing Alkaline Extraction and Isoelectric Precipitation	248	<i>Tamabaeva B.S., Kydyraliev N.A., Abakirova E.M., Azisova M.A.</i> Functional Yak Meat Products	355
<i>Kutuzov M.N., Belova M.A., Novichenko O.V., Nikitin I.A., Zaroual H., Vishnyakov V.S., Vilkova D.D.</i> Targeted and Untargeted Methods for Fish Quality Assessment (<i>Oncorhynchus mykiss</i>)	260	<i>Lobzanova M.E., Yustratov V.P., Ivanova S.A.</i> Effect of Glycine on Thermal Stability of Folic Acid during Baking	369
<i>Glukharev A.Yu., Kuchina Yu.A., Derkach S.R., Knyazeva A.S., Utyanov D.A.</i> Protein Isolates from Defatted Pea Flour: Production and Quality Assessment	278	<i>Merzlyakova N.V., Tikhonov S.L., Tikhonova N.V., Timofeeva M.S., Semin A.N., Kurdyumov A.V., Lylov A.S.</i> Oral Delivery of Bioactive Protein Molecules: Problems and Perspectives	381
<i>Golub O.V., Zakharenko A.M., Motovilova N.V., Motovilov O.K., Golokhvast K.S.</i> Effect of Plant-Based Semi-Finished Products and Additives on the Beverages Quality	297	<i>Malkov D.I., Sukhikh S.A., Kashirskikh E.V., Balashova K.A., Barzkar N.</i> Study of the Structure, Production Methods, and Application of Fucoidan	401
		<i>Churysheva A.A., Sukhinina T.V., Esepenok K.V.</i> Validation as a Tool of Food Safety Management in Poultry Processing	423