

Том 56, № 3, 2026  
Vol. 56, № 3, 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, Заслуженный работник высшей школы РФ, Лауреат премии Правительства РФ в области науки и техники, Почетный работник высшего профессионального образования РФ, Кемеровский государственный университет, Кемерово, Россия.

*Зам. главного редактора*

**Лосева Анна Ивановна**, д-р техн. наук, Кемеровский государственный университет, Кемерово, Россия.

*Редакционная коллегия*

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

**Барзкар Нура**, д-р наук (Морская биология), Институт морских исследований Борнео, Университет Малайзии Сабах, Кота-Кинабалу, Малайзия;

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

**Боков Дмитрий Олегович**, канд. фарм. наук, Первый Московский государственный медицинский университет имени И.М. Сеченова Министерства здравоохранения РФ, Москва, Россия;

**Бычкова Светлана Михайловна**, д-р экон. наук, Заслуженный работник высшей школы РФ, Гатчинский государственный университет, Гатчина, Россия;

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

**Ирфан Мухаммад**, д-р наук (Фундаментальная ветеринария), Университет Саргодхи, Саргодха, Пакистан;

**Йианг Ююн**, д-р наук (Биотехнология сельскохозяйственных культур), Колледж пищевых наук Северо-Восточного сельскохозяйственного университета, Харбин, Китай;

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

**Лобанов Владимир Григорьевич**, д-р техн. наук, Заслуженный работник высшей школы РФ, Почетный работник высшего профессионального образования РФ, Кубанский государственный технологический университет, Краснодар, Россия;

**Минина Варвара Ивановна**, д-р биол. наук, Кемеровский государственный университет, Кемерово, Россия;

**Серба Елена Михайловна**, член-корреспондент РАН, д-р биол. наук, канд. техн. наук, Всероссийский научно-исследовательский институт пищевой биотехнологии, Москва, Россия;

**Сухих Станислав Алексеевич**, д-р техн. наук, Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта, Калининград, Россия;

**Хмелев Владимир Николаевич**, д-р техн. наук, Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет имени И.И. Ползунова», Бийск, Россия;

**Хотимченко Юрий Степанович**, д-р биол. наук, Заслуженный деятель науки РФ, Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Россия;

**Чернуха Ирина Михайловна**, академик РАН, д-р техн. наук, Заслуженный деятель науки РФ, Федеральный научный центр пищевых систем имени В.М. Горбатова РАН, Москва, 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](mailto:fptt98@gmail.com)

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

Дата выхода в свет 30.09.26

Усл. п. л. 25,81. 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



Колонка главного редактора  
<https://fptt.ru>

Продовольственный ресурс – важный фактор в современной геополитике и мировой экономике. Российский агропромышленный комплекс продолжает развиваться, внедряя новые технологии и адаптируясь к современным вызовам. По официальным данным, в 2025 г. объем производства в российском АПК вырос на 5 %. Достигнутые результаты позволили обеспечить выполнение основных параметров Доктрины продовольственной безопасности и укрепить самообеспеченность по ключевым направлениям. Экспорт сельскохозяйственной продукции и продовольствия превысил 4 млрд долларов.

Основным драйвером устойчивого развития отраслей российского АПК является широкое применение агробιοтехнологий. Использование биологических процессов и микроорганизмов позволяет более эффективно работать с возобновляемыми ресурсами, перерабатывать побочные продукты производства и снижать экологическую нагрузку на агросистемы. Современные методы молекулярной биологии и анализа ДНК расширяют возможности изучения микробных сообществ, связанных с сельскохозяйственными животными и пищевым сырьем, а также способствуют поиску новых подходов к профилактике заболеваний и повышению качества продукции.

По прогнозам Центра отраслевой экспертизы Россельхозбанка, к 2028 г. объем российского рынка биотехнологий в сельском хозяйстве может достичь 190 млрд руб. На сегодняшний день на долю АПК приходится около 26 % российского рынка биотехнологий, что составляет 149 млрд руб.

Агробιοтехнологии охватывают широкий спектр разработок: биологические средства защиты растений, биоудобрения и ветеринарные препараты, биотехнологические методы получения пищевых и кормовых компонентов, а также технологии селекции растений и животных с заданными свойствами. Отдельное направление связано с созданием функциональных и специализированных продуктов, обогащенных биологически активными веществами, а также с внедрением новых пищевых продуктов и альтернативных источников белка. Российские ученые сегодня стремительными темпами развивают биотехнологии в разных отраслях: медицине, фармацевтике, сельском хозяйстве, пищевом производстве.

Развитие этих направлений невозможно без фундаментальных и прикладных исследований, объединяющих достижения биологии, пищевых технологий, ветеринарии и смежных научных областей. Значительный вклад в эту работу вносит академик РАН, доктор технических наук, профессор Ирина Михайловна Чернуха.

Ирина Михайловна Чернуха – признанный специалист в области системных исследований агробιοтехнологий. Основные направления ее научной деятельности связаны с оценкой качества и безопасности мяса и мясных продуктов, биотехнологией кормов, прижизненным формированием мясного сырья с заданными характеристиками, разработкой функциональных и специализированных продуктов, изучением биоактивных пептидов, применением «омных» технологий, а также использованием цифровых методов в пищевых технологиях.

Под руководством Ирины Михайловны проводятся исследования, направленные на создание продуктов с биологически активными пептидами. Разработаны подходы к выделению и оценке активности пептидных компонентов, обладающих потенциально значимыми биологическими свойствами, и технологии получения продуктов с использованием белковых компонентов заданного состава.

Сегодня Ирина Михайловна продолжает активную научную и организационную деятельность. Она является главным научным сотрудником и руководителем Отдела координации международных и инициативных проектов ФГБНУ «Федеральный научный центр пищевых систем им. В. М. Горбатова» РАН, членом Президиума РАН и бюро Научного совета РАН «Науки о жизни».

Профессиональные заслуги Ирины Михайловны отмечены государственными и профессиональными наградами. В 2026 г. ей присвоено почетное звание «Заслуженный деятель науки Российской Федерации». В 2024 г. награждена юбилейной медалью «300 лет Российской академии наук» и благодарственным письмом Президента Российской Федерации В. В. Путина. В 2023 г. Ирина Михайловна стала лауреатом премии Правительства Российской Федерации в области науки и техники за работу «Разработка и внедрение инновационных технологий в животноводстве для обеспечения населения высококачественными продуктами питания».

4 ноября 2026 г. академик РАН, доктор технических наук, профессор Ирина Михайловна Чернуха отмечает юбилей. Редакция журнала сердечно поздравляет Ирину Михайловну с этой знаменательной датой. Желаем крепкого здоровья, счастья и благополучия, спокойствия и тепла, неиссякаемой энергии и вдохновения для новых научных идей и проектов. Пусть профессиональные достижения получают достойное признание, а рядом всегда будут близкие люди, коллеги, ученики и единомышленники, поддерживающие и разделяющие радость новых свершений.

Ректор, главный редактор,  
академик РАН, профессор,  
Заслуженный работник высшей школы РФ,  
Лауреат премии Правительства РФ в области науки и техники

А. Ю. Просеков 

<https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-3-2648>  
<https://elibrary.ru/YOKKDY>

Оригинальная статья  
<https://fptt.ru>

## Влияние дрожжей рода non-*Saccharomyces* на показатели качества сидров



А. А. Ширшова<sup>1,\*</sup>, А. А. Храпов<sup>1</sup>,  
Н. М. Агеева<sup>1</sup>, Е. А. Аль-Накиб<sup>1</sup>, Е. В. Глоба<sup>1</sup>,  
И. В. Сердюков<sup>1</sup>, А. Р. Изофатов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Северо-Кавказский федеральный научный центр садоводства, виноградарства, виноделия<sup>ROR</sup>,  
Краснодар, Россия

<sup>2</sup> Кубанский государственный технологический университет<sup>ROR</sup>, Краснодар, Россия

Поступила в редакцию: 25.03.2026

Принята после рецензирования: 28.04.2026

Принята к публикации: 07.07.2026

\*e-mail: [anastasiya\\_1987@inbox.ru](mailto:anastasiya_1987@inbox.ru)

© А. А. Ширшова, А. А. Храпов, Н. М. Агеева, Е. А. Аль-Накиб,  
Е. В. Глоба, И. В. Сердюков, А. Р. Изофатов, 2026



### Аннотация.

Сидр – слабоалкогольный напиток с уникальным ароматом и вкусом, изготовленный из свежего яблочного сока путем брожения. В последние годы помимо дрожжей рода *Saccharomyces*, все чаще объектом исследований становятся дрожжи non-*Saccharomyces* из-за их положительного влияния на показатели качества сидра. Сорта яблони, произрастающие в Краснодарском крае (Россия) и используемые для производства сидров, характеризуются высоким содержанием сахаров, что обусловлено природно-климатическими условиями региона. Цель исследования – изучить влияние чистых культур дрожжей-несахаромицетов *Lachancea thermotolerans*, *Metschnikowia pulcherrima* и *Torulaspora delbrueckii* на показатели качества сидров из плодов яблони, выращенных в Краснодарском крае.

Объекты исследования – образцы сидров, изготовленные из плодов яблони селекции ФГБНУ «Северо-Кавказский федеральный научный центр садоводства, виноградарства, виноделия» (Краснодар, Россия) с применением чистых культур дрожжей видов *L. thermotolerans*, *T. delbrueckii*, *M. pulcherrima* и *S. cerevisiae*. Физико-химические и органолептические показатели сидров определяли методами по действующим ГОСТ и ГОСТ Р; цветовые характеристики – спектрофотометрическим методом; легколетучие компоненты – методом газовой хроматографии.

Установлено, что процесс брожения под действием ферментных систем монокультур дрожжей рода non-*Saccharomyces* протекает медленнее (в среднем на 5 суток), чем под действием *S. cerevisiae*. В сидрах, изготовленных с применением non-*Saccharomyces*, показатели массовых концентраций титруемых кислот и сахаров ниже на 14–22 и 31–39 % соответственно, а остаточного экстракта – выше на 33–46 % по сравнению с сидром, сброженным *S. cerevisiae*. Последовательная инокуляция non-*Saccharomyces* и *S. cerevisiae* через 72 ч позволила получить сидры с меньшим содержанием спирта (на 2–21 %). В аромате образцов сидров с более высокой концентрацией гексанола присутствовали растительные оттенки.

При проведении совместного брожения и последовательной инокуляции определено рекомендуемое время внесения дрожжей *S. cerevisiae* в яблочное сусло: для брожения с *L. thermotolerans* – не ранее 72 ч; для *M. pulcherrima* – через 24 ч; для *T. delbrueckii* – через 48 ч.

**Ключевые слова.** Сидр, плоды яблони, яблочное сусло, *Lachancea thermotolerans*, *Metschnikowia pulcherrima*, *Torulaspora delbrueckii*, *Saccharomyces cerevisiae*, динамика брожения, цветовые характеристики, органолептические показатели

**Финансирование.** Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-76-10012, <https://rscf.ru/project/25-76-10012/> на базе ФГБНУ СКФНЦСВВ.

**Для цитирования:** Ширшова А. А., Храпов А. А., Агеева Н. М., Аль-Накиб Е. А., Глоба Е. В. и др. Влияние дрожжей рода non-*Saccharomyces* на показатели качества сидров. Техника и технология пищевых производств. 2026. Т. 56. № 3. С. 434–449. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-3-2648>

## Effect of Non-*Saccharomyces* Yeasts on Cider Quality

Anastasia A. Shirshova<sup>1,\*</sup>, Anton A. Khrapov<sup>1</sup>,  
Natalia M. Ageyeva<sup>1</sup>, Ekaterina A. Al-Nakib<sup>1</sup>, Ekaterina V. Globa<sup>1</sup>,  
Igor V. Serdyukov<sup>1</sup>, Andrey R. Izofatov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> North Caucasian Federal Scientific Center of Horticulture, Viticulture, Wine-making<sup>ROR</sup>, Krasnodar, Russia

<sup>2</sup> Kuban State Technological University<sup>ROR</sup>, Krasnodar, Russia

Received: 25.03.2026  
Revised: 28.04.2026  
Accepted: 07.07.2026

\*e-mail: [anastasiya\\_1987@inbox.ru](mailto:anastasiya_1987@inbox.ru)  
© A.A. Shirshova, A.A. Khrapov, N.M. Ageyeva, E.A. Al-Nakib, E.V. Globa,  
I.V. Serdyukov, A.R. Izofatov, 2026



### Abstract.

Cider is a low-alcohol fermented apple beverage with a unique aroma and flavor. Non-*Saccharomyces* yeasts have a reliable positive impact on the sensory profile of ciders. Cider apple varieties grown in the Krasnodar Region are rich in sugar ( $\leq 180 \text{ g/dm}^3$ ) due to the local natural and climatic conditions. This study investigates the effect of non-*Saccharomyces* yeasts *Lachancea thermotolerans*, *Metschnikowia pulcherrima*, and *Torulaspora delbrueckii* on the quality of Krasnodar apple cider.

The cider samples were produced from the fresh apple juice obtained by fermenting apple varieties cultivated at the North Caucasus Federal Scientific Center for Cider Production with pure yeast cultures of *L. thermotolerans*, *T. delbrueckii*, *M. pulcherrima*, and *S. cerevisiae*. The physicochemical and sensory properties were determined using the current interstate and state standards. The color profile was described by the spectrophotometric method; the volatile components were identified using gas chromatography. The fermentation process induced by non-*Saccharomyces* enzyme systems proceeded slower (by 5 days on average) than the fermentation triggered by *S. cerevisiae*. The non-*Saccharomyces* ciders demonstrated lower mass concentrations of titrated acids by (14–22%) and sugars (31–39%) while the mass concentration of the residual extract was higher by 33–46. The sequential inoculation of non-*Saccharomyces* and *S. cerevisiae* made it possible to obtain ciders with a lower alcohol content (by 2–21%) after 72 h. The samples with a higher concentration of hexanol demonstrated herbaceous aroma.

Based on the co-fermentation and sequential inoculation, the optimal timing for introducing *S. cerevisiae* yeasts was as follows: after 72 h for *L. thermotolerans*; after 24 h for *M. pulcherrima*; after 48 h for *T. delbrueckii*.

**Keywords.** Cider, apple fruits, apple must, *Lachancea thermotolerans*, *Metschnikowia pulcherrima*, *Torulaspora delbrueckii*, *Saccharomyces cerevisiae*, fermentation dynamics, color characteristics, sensory profile

**Funding.** The research was supported by the Russian Science Foundation (Grant No. 25-76-10012, <https://rscf.ru/project/25-76-10012/>).

**For citation:** Shirshova AA, Khrapov AA, Ageyeva NM, Al-Nakib EA, Globa EV, et al. Effect of Non-*Saccharomyces* Yeasts on Cider Quality. Food Processing: Techniques and Technology. 2026;56(3):434–449. (In Russ.) <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-3-2648>

### Введение

Сидр – слабоалкогольный напиток с уникальным ароматом и вкусом, изготовленный из свежего яблочного сока (сусла) путем брожения. Алкогольное брожение сопровождается многочисленными сложными биохимическими процессами, происходящими под действием ферментных систем различных микроорганизмов, главным образом дрожжей [1, 2]. Дрожжи встречаются не только в почве садов или на поверхности спелых, неповрежденных плодов яблони, но и являются частью естественной флоры помещений, в которых перерабатывают плоды яблони, оказывают различное влияние на процессы брожения, особенно на начальном его этапе, а также при спонтанных ферментациях. Помимо дрожжей рода *Saccharomyces*

*cerevisiae*, составляющих лишь небольшую долю в многообразии естественного микробиома, микрофлора плодов яблони в основном включает несакхаромицеты (non-*Saccharomyces*), в т. ч. дрожжи *Torulaspora delbrueckii*, *Metschnikowia pulcherrima*, *Kluyveromyces marxianus*, *Zygosaccharomyces bailii*, *Hanseniaspora uvarum*, *H. guilliermondii* и *H. occidentalis*, *Pichia* spp., *Debaryomyces* spp., *Rhodotorula* spp. и *Candida* [3, 4].

Дрожжи *S. cerevisiae* широко применяются для производства алкогольных напитков благодаря способности продуцировать этиловый спирт за счет эффективного потребления сахара и высокой устойчивости к факторам среды [5]. Также этот вид известен способностью образовывать ароматические соединения, такие как высшие спирты, сложные эфиры и терпены [6, 7].

Долгое время считалось, что продукты метаболизма дрожжей *non-Saccharomyces* оказывали негативное влияние на показатели качества напитков брожения, среди которых наиболее распространены вино и сидр, а именно на аромат и вкус, вызывая развитие посторонних тонов и порчу напитков [8, 9]. Поэтому естественную микрофлору было принято подавлять добавлением серосодержащих препаратов и чистых культур дрожжей. В последние два десятилетия *non-Saccharomyces* все чаще становятся объектом исследований из-за их положительного влияния на качество напитков [10]. Продукты метаболизма, продуцируемые этими дрожжами в смешанных ферментациях с *S. cerevisiae*, способствуют формированию различных оттенков аромата и приданию сложности вкусу сидра [11, 12].

Более того, дрожжи *non-Saccharomyces* обладают более высокой ферментативной активностью, чем *S. cerevisiae*, и могут усиливать первичные (характерные сырью) и вторичные (образующиеся во время брожения) ароматы за счет способности к формированию летучих веществ, таких как этилкаприлат (тон яблока), этилгексаноат (тон груши), изоамилацетат (тон банана) и различных терпенов (цветочные и фруктовые тона). Несмотря на наблюдаемые положительные эффекты, большинство дрожжей *non-Saccharomyces* не способны к полному сбраживанию имеющихся сахаров в сусле и завершению спиртового брожения, что объясняется их слабой толерантностью к этиловому спирту (примерно 2–4 % об.) [13, 14]. Совместное брожение с *S. cerevisiae*, включая одновременную или последовательную инокуляцию, является эффективным способом улучшения показателей качества, в т. ч. органолептических характеристик готового напитка [5].

Чистые культуры дрожжей *non-Saccharomyces* различаются по активности ферментативных систем, диапазонам оптимальных температур, интенсивности и скорости сбраживания сахаров, спиртоустойчивости, способности накапливать промежуточные и вторичные продукты брожения, обуславливающие те или иные органолептические характеристики готового сидра.

В последние годы наблюдаются существенные изменения климата, приводящие к возникновению ряда проблем в виноградарстве и виноделии, а именно к повышению уровня сахаров и понижению содержания титруемых кислот в ягодах винограда. В этом контексте дрожжи вида *Lachancea thermotolerans* вызывают интерес у производителей винодельческой продукции. Это связано с тем, что данный вид микроорганизмов обладает высоким потенциалом к производству молочной кислоты (2,0–9,0 г/дм<sup>3</sup>) из сахаров (глюкозы), содержащихся в виноградном сусле, повышению массовой концентрации титруемых кислот и снижению значения pH. Кроме того, в исследовании [15] показано, что для изготовления напитков при совместном брожении *L. thermotolerans* и *S. cerevisiae* отмечается значительное повышение концентрации таких ароматических летучих веществ, как фенилэтиловый спирт (увеличение

на 4–38 %), фенилэтилацетат (на 7–303 %), этиллактат (в 5 раз) и этилацетат (на 3–84 %), линалоол, а также некоторых терпенов, определяющих присутствие фруктовых и цветочных тонов в аромате готовых напитков [16].

Дрожжи вида *T. delbrueckii* используют для снижения массовой концентрации титруемых кислот и уксусной кислоты. Эти дрожжи способны синтезировать исключительно высокие концентрации полиолов – многоатомных спиртов (арабита, рибита, сорбита, маннита и ксилита) и эфиров. Полиолы обеспечивают дрожжевым клеткам защиту от осмотического стресса, благодаря чему дрожжи вида *T. delbrueckii* подходят для брожения сусла из плодов яблони позднего сбора и производства айс-сидров, а также обладают высокой скоростью седиментации и, как следствие, способствуют обеспечению более высокой интенсивности цвета и более низкой концентрации общих и мономерных антоцианов [1]. Дрожжи вида *T. delbrueckii* синтезируют высшие спирты, эфиры (бутираты, пропионаты и ацетаты), за счет чего в аромате и вкусе сидра формируются сложные фруктовые и цветочные тона; увеличивается концентрация глицерина – проявляется мягкость и округлость во вкусе [17]. Дрожжи вида *T. delbrueckii* синтезируют меньшие концентрации летучих кислот (в пересчете на уксусную кислоту) по сравнению со многими штаммами рода *S. cerevisiae* и проявляют регулярную (равномерную) кинетику брожения, в т. ч. в атмосфере углекислого газа. Благодаря этим свойствам они подходят для изготовления игристых сидров, в частности за счет обеспечения хороших пенных и игристых характеристик напитков при вторичном брожении [18].

Применение дрожжей рода *Metschnikowia* может расширить разнообразие органолептических характеристик сидра. В работе [19] показано, что в микрофлоре сидров встречались следующие виды *Metschnikowia*: *M. koreensis*, *M. reukaufii* и *M. pulcherrima*. Дрожжи вида *M. pulcherrima* проявляют потенциал к производству напитков с более низким содержанием этилового спирта (0,6–1,2 % об.) и применяются для сбраживания сусла с высокой концентрацией сахаров и при необходимости ее понижения [20]. Этот вид дрожжей характеризуется высоким уровнем активности ферментов, участвующих в высвобождении сортовых ароматов – терпенов (линалоол, гераниол, цитраль, цитронелол, нерол и др.), содержащихся в плодах яблони и сусле в виде гликозидов, не имеющих аромата. Под действием ферментов  $\alpha$ -арабинофуранозидазы и  $\beta$ -глюкозидазы терпены становятся «ароматически активными» и вносят свой вклад в типичность, аромат и вкус сидров. Кроме того, применение дрожжей вида *M. pulcherrima* способствует накоплению более высоких концентраций глицерина, ацетатных эфиров и высших спиртов, а также более низких концентраций уксусной кислоты в винах и сидрах, что обеспечивает придание сложности аромата (цветочные, растительные тона и оттенки свежих фруктов) и округлости вкуса [21].



Совместная ферментация дрожжами *S. cerevisiae* и *M. pulcherrima* приводит к формированию более сложного и яркого аромата за счет образования наибольшего количества и разнообразия летучих компонентов, таких как фенилэтиловый спирт, 3-метил-1-бутанол, этилоктаноат и декановая кислота [19]. Ароматобразующие легколетучие компоненты сидров, произведенных из различных сортов яблони, также имеют решающее значение для формирования органолептических показателей готового напитка [22].

Сорта яблони, которые произрастают и используются для производства сидров в Краснодарском крае (Россия), характеризуются достаточно высоким содержанием сахаров (до 180 г/дм<sup>3</sup>), что связано с природно-климатическими условиями региона и делает практически невозможным получение сидра с объемной долей этилового спирта не более 6 %. Изучение влияния дрожжей-несахаромицетов *L. thermotolerans*, *M. pulcherrima* и *T. delbrueckii* на органолептические показатели качества сидра из плодов яблони, выращенных в Краснодарском крае ранее не проводилось. В связи с этим актуальным становится применение коммерческих препаратов чистых культур поп-*Saccharomyces* в технологии изготовления сидров для получения напитков с меньшим содержанием этилового спирта и более высокой концентрацией присущих ароматических веществ.

Цель исследования – изучить влияние чистых культур дрожжей-несахаромицетов *L. thermotolerans*, *M. pulcherrima* и *T. delbrueckii* на показатели качества сидра из плодов яблони, выращенных в Краснодарском крае.

#### Объекты и методы исследования

Объектами исследования стали образцы сидров, изготовленные в результате брожения свежего яблочного сока (сусла) из плодов яблони (сортосмеси) селекции ФГБНУ «Северо-Кавказский федеральный научный центр садоводства, виноградарства, виноделия» (СКФНЦСВВ) (Краснодар, Россия), урожая 2025 г. (Орфей, Марго, Персиковое, Стасовское и Ренет Платона). Отобранные плоды яблони находились в состоянии технологической зрелости: массовая концентрация сахаров в свежем яблочном сусле из смеси сортов – 105 г/дм<sup>3</sup>; массовая концентрация титруемых кислот – 7,2 г/дм<sup>3</sup> в пересчете на яблочную кислоту; pH – 3,61. Опытные образцы сидра готовили в лабораторно-производственном подразделении «Микровиноделие» ФГБНУ СКФНЦСВВ следующим образом: плоды яблони мыли, измельчали с помощью дробилки (мощность двигателя – 1,1 кВт; производительность – 500 кг/ч), мацерацию проводили в течение 12 ч при температуре 5 ± 1 °С, после чего прессовали на гидравлическом прессе с мембраной EPDM давлением 250 кг/см<sup>2</sup> (ООО «Ректифай», Россия).

Для исключения развития спонтанной микрофлоры в сусло вносили метабисульфит калия в дозировке, соответствующей содержанию диоксида серы в све-

жем яблочном сусле (50 мг/дм<sup>3</sup>). Полученное свежее яблочное сусло делили на равные части и сбраживали в стеклянных емкостях с гидрозатворами при температуре 17 ± 1 °С, предварительно вносили дрожжи видов *Lachancea thermotolerans*, *Torulaspora delbrueckii*, *Metchnikowia pulcherrima* (LEVEL2 LAKTIA, LEVEL2-FLAVIA, LEVEL2 BIODIVA соответственно; Lallemant, Франция) и дрожжи *Saccharomyces cerevisiae* (RV 10; Angel Yeast Co., Ltd., Китай). Препараты сухих активных дрожжей активировали в соответствии с рекомендациями производителей. Условия, при которых проводили брожение, были одинаковыми для всех образцов. По окончании активного брожения сброженное яблочное сусло снимали с дрожжевого осадка, осветляли отстаиванием и хранили в условиях, исключающих воздействие кислорода воздуха, при температуре 5 ± 1 °С до проведения исследований.

Схема проведенных опытов:

- контроль – *S. cerevisiae*;
- образец 1 – *L. thermotolerans* + *S. cerevisiae* (внесение через 24 ч);
- образец 2 – *L. thermotolerans* + *S. cerevisiae* (внесение через 48 ч);
- образец 3 – *L. thermotolerans* + *S. cerevisiae* (внесение через 72 ч);
- образец 4 – *L. thermotolerans* (без внесения *S. cerevisiae*);
- образец 5 – *T. delbrueckii* + *S. cerevisiae* (внесение через 24 ч);
- образец 6 – *T. delbrueckii* + *S. cerevisiae* (внесение через 48 ч);
- образец 7 – *T. delbrueckii* + *S. cerevisiae* (внесение через 72 ч);
- образец 8 – *T. delbrueckii* (без внесения *S. cerevisiae*);
- образец 9 – *M. pulcherrima* + *S. cerevisiae* (внесение через 24 ч);
- образец 10 – *M. pulcherrima* + *S. cerevisiae* (внесение через 48 ч);
- образец 11 – *M. pulcherrima* + *S. cerevisiae* (внесение через 72 ч);
- образец 12 – *M. pulcherrima* (без внесения *S. cerevisiae*).

Штамм LEVEL2 LAKTIA *L. thermotolerans* преобразовывает глюкозу в молочную кислоту и продуцирует ее до 9,0 г/дм<sup>3</sup> в зависимости от установленных условий брожения, что значительно повышает массовую концентрацию титруемых кислот и снижает pH среды. Данные дрожжи оказывают положительное влияние на органолептические показатели сидра благодаря образованию таких ароматических соединений, как 2-фенилэтанол, линалоол и др., а также глицерина.

Штамм LEVEL2 BIODIVA *T. delbrueckii* способен синтезировать значительные концентрации полиолов – многоатомных спиртов: глицерина, арабита, рибита, сорбита, маннита и ксилита. Полиолы обеспечивают дрожжевым клеткам защиту от осмотического стресса, благодаря чему штамм подходит для брожения сусла



из плодов яблони с повышенным содержанием сахаров. Кроме того, LEVEL2 BIODIVA способствует быстрой седиментации частиц среды и обеспечивает более высокую интенсивность цвета.

Штамм LEVEL2 FLAVIA *M. pulcherrima* обладает высоким уровнем ферментативной активности, способствующей высвобождению сортовых ароматов: терпенов (линалоол, гераниол, нерол и др.), содержащихся в сусле в виде гликозидов и не имеющих аромата; летучих тиолов, присутствующих в сусле в виде цистеин-связанных прекурсоров и высвобождающихся за счет  $\beta$ -лиазной активности дрожжей.

Ферментативная активность LEVEL2 FLAVIA обеспечивает получение интенсивного и сложного аромата сидров. Применение при последовательной инокуляции с *S. cerevisiae* дрожжей *M. pulcherrima* позволяет полностью раскрыть потенциал ароматов используемых в технологии сидров сортов яблони.

Контроль динамики брожения осуществляли ежедневно рефрактометрическим методом. Физико-химические показатели опытных образцов сидров определяли с использованием стандартных методов (ГОСТ и ГОСТ Р): массовой концентрации сахаров – методом прямого титрования растворами Феллинга; титруемых кислот – кислотно-щелочным титрованием в присутствии индикатора бромтимолового синего и с применением потенциометра; объемной доли этилового спирта – ареометрическим методом в дистилляте после предварительной перегонки образца; летучих кислот – титрованием щелочью летучих кислот, выделенных из сидра путем перегонки с водяным паром; остаточного экстракта – пикнометрическим методом по разности относительной плотности продукта и его дистиллята с вычетом значений массовых концентраций сахаров и титруемых кислот; pH – потенциометрическим методом. Массовую концентрацию индивидуальных органических кислот выявляли методом капиллярного электрофореза с помощью Капель-105М (ООО «Люмэкс», Россия) по ГОСТ Р 52841-2007.

Анализ летучих соединений (высших спиртов, сложных эфиров, ацетальдегида, летучих кислот и др.) осуществляли методом газовой хроматографии на хроматографе Кристаллюкс-4000М (ООО «Мета-хром», Россия) с пламенно-ионизационным детектором (ПИД). Использовали капиллярную колонку HP-FFAP (50 м × 0,32 мм × 0,52 мкм). Газ-носитель – азот. Режим хроматографирования: температурный градиент от 70 °C (выдержка 8,5 мин) до 180 °C со скоростью 5–7 °C/мин; температура испарителя 180–220 °C; детектора 220–240 °C. Пробу разбавляли дистиллированной водой в 2 раза. Объем вводимой пробы – 1 мкл (режим с делением потока). Количественный расчет проводили методом абсолютной калибровки по внешним стандартам.

Цветовые характеристики сидров исследовали по методу OIV-MA-AS2-07B с применением спектрофотометра UV7 УФ-видимого диапазона (Mettler Toledo, Швейцария). Оптическую плотность образцов измеряли

при длинах волн 420, 520 и 620 нм (желтый, красный и синий оттенки соответственно) в кювете с толщиной слоя 2 см. Интенсивность ( $I$ ) и оттенок цвета ( $N$ ) рассчитывали по общепринятым формулам.

Органолептические показатели опытных образцов сидров оценивали по 10-бальной шкале (ГОСТ 32051–2013): внешний вид, аромат, вкус и общее впечатление. Дегустацию проводили открыто комиссией научного центра «Виноделие» (СКФНЦСВВ, Краснодар, Россия) в составе 10 членов. Проходной балл в соответствии с внутренним регламентом дегустационной комиссии составлял 7,30. Исследования выполнены на базе научного центра «Виноделие» и центра коллективного пользования «Приборно-аналитический» (СКФНЦСВВ, Краснодар, Россия).

Статистическую обработку экспериментальных данных, полученных не менее чем в трехкратной повторности, выполняли с использованием программы Microsoft Excel 2021; применяли коэффициенты корреляции Пирсона, множественный регрессионный анализ и рассчитывали стандартное отклонение при  $p < 0,05$ .

### Результаты и их обсуждение

Динамика брожения – важный технологический фактор, позволяющий оценивать физиологическое состояние дрожжевых клеток и скорость сбраживания сахаров. Массовая концентрация сахаров в свежем яблочном сусле составляла 105 г/дм<sup>3</sup>. Динамика изменения данного показателя в процессе брожения яблочного сусла различными штаммами дрожжей представлена на рисунке 1.

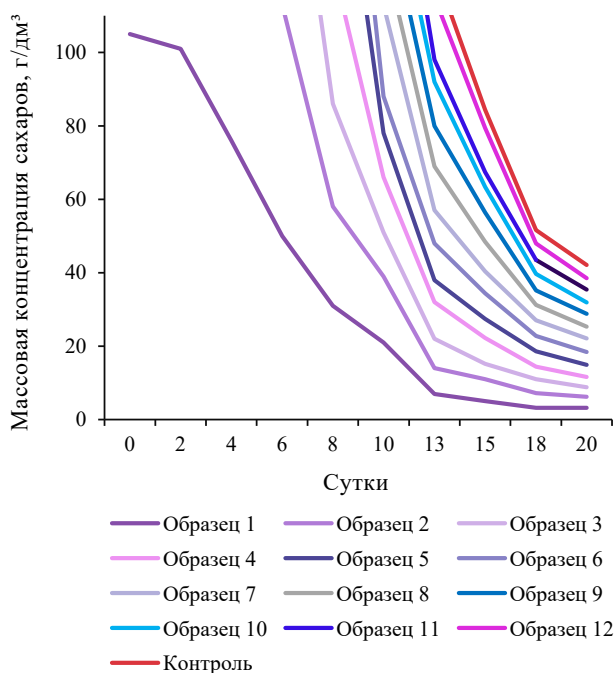


Рисунок 1. Динамика изменения массовой концентрации сахаров в процессе брожения яблочного сусла

Figure 1. Mass concentration of sugars during fermentation

В контрольном образце, изготовленном с применением чистой культуры дрожжей рода *Saccharomyces cerevisiae*, наблюдалось наиболее быстрое снижение массовой концентрации сахаров. К 4-м суткам брожения содержание сахаров снизилось до 65,0 г/дм<sup>3</sup>, к 8-м суткам – до 25,0 г/дм<sup>3</sup>. Брожение завершилось на 15-е сутки (3,6 г/дм<sup>3</sup>).

В образцах бродящего суслу с внесенными чистыми культурами *non-Saccharomyces* отмечена замедленная динамика брожения. Так, в образце сидра, сброженном только *Lachancea thermotolerans* (образец 4), на 8-е сутки массовая концентрация сахаров составляла 38,0 г/дм<sup>3</sup>. Схожая динамика наблюдалась при использовании *Torulaspora delbrueckii* (образец 8): к 8-м суткам концентрация сахаров снизилась до 38,0 г/дм<sup>3</sup>, однако активная фаза брожения началась лишь после 13-х суток и завершилась к 20-м суткам с остаточной концентрацией сахаров 3,2 г/дм<sup>3</sup>. В образце 12, сброженном *Metschnikowia pulcherrima*, к 8-м суткам массовая концентрация сахаров соответствовала 71,0 г/дм<sup>3</sup>, активная фаза также началась после 13-х суток и завершилась к 20-м суткам при остаточной концентрации сахаров 3,1 г/дм<sup>3</sup>.

Отмечено, что последовательное введение разводки дрожжей вида *S. cerevisiae* во все опытные образцы сидров (образцы 1–3, 5–7, 9–11) способствовало интенсификации процесса брожения. Однако время внесения дрожжей вида *S. cerevisiae* оказывало значительное влияние на общую продолжительность брожения и конечную массовую концентрацию сахаров.

В образцах сидра, изготовленных с применением *L. thermotolerans*, наиболее активное брожение отмечено в образце 1, в котором дрожжи *S. cerevisiae* внесены через 24 ч. В данном образце суслу к 4-м суткам концентрация сахаров снизилась до 76,0 г/дм<sup>3</sup>, к 6-м – до 50,0 г/дм<sup>3</sup>, остаточная массовая концентрация сахаров (3,2 г/дм<sup>3</sup>) была достигнута к 18-м суткам. Задержка внесения *S. cerevisiae* до 48 и 72 ч (образцы 2 и 3) приводила к пропорциональному замедлению процесса брожения: на 6-е сутки в этих опытных образцах фиксировалась концентрация сахаров 63,0 и 71,0 г/дм<sup>3</sup>, а брожение завершилось при 3,0 и 2,8 г/дм<sup>3</sup> соответственно, что было ниже, чем в контрольном образце (3,6 г/дм<sup>3</sup>).

В образцах 5–7, которые изготовлены с применением *T. delbrueckii*, наиболее интенсивная динамика брожения наблюдалась в образце 5 (с внесением *S. cerevisiae* через 24 ч): к 8-м суткам концентрация сахаров составила 52 г/дм<sup>3</sup>, что было выше аналогичного значения в контрольном образце (только *S. cerevisiae*) на те же сутки (25 г/дм<sup>3</sup>). В образцах 6 и 7 (с внесением *S. cerevisiae* через 48 и 72 ч соответственно) прослеживалась та же закономерность, что и в образцах с *L. thermotolerans*: более позднее внесение *S. cerevisiae* сдвигало активную фазу брожения на 8–10-е сутки. Остаточная массовая концентрация сахаров во всех опытных образцах сидра, полученных с внесением

*T. delbrueckii*, была в диапазоне 3,3–3,7 г/дм<sup>3</sup>, что находилось на уровне контрольного образца.

При изучении динамики брожения образцов 9–12, изготовленных с применением *M. pulcherrima*, в образце с внесением *S. cerevisiae* через 24 ч массовая концентрация сахаров на 4-е сутки достигала 89 г/дм<sup>3</sup>, что было выше, чем в контрольном образце (65 г/дм<sup>3</sup>). Увеличение времени задержки внесения *S. cerevisiae* до 48 и особенно до 72 ч приводило к замедлению брожения: на 6-е сутки в образце 11 концентрация сахаров составляла 72 г/дм<sup>3</sup>, тогда как в контрольном образце, сброженном *S. cerevisiae*, к этому моменту было достигнуто значение 45 г/дм<sup>3</sup>. Несмотря на это, к 20-м суткам во всех образцах с *M. pulcherrima* брожение завершилось полностью, а остаточная массовая концентрация сахаров была на уровне 3,1–3,5 г/дм<sup>3</sup>.

Таким образом, продолжительность забраживания образцов яблочного суслу с применением чистых культур *non-Saccharomyces* положительно коррелировала с общей длительностью всего процесса брожения. Во всех опытных образцах сидра, полученных с использованием *non-Saccharomyces*, внесение *S. cerevisiae* через 24 ч ускоряло брожение, тогда как задержка его внесения до 72 ч приводила к существенному замедлению. При этом в образцах с *L. thermotolerans* отмечены более низкая остаточная концентрация и объемная доля этилового спирта.

В результате анализа физико-химических показателей установлено, что все образцы сидров соответствовали требованиям ГОСТ 31820-2015. Выявлены значительные различия по показателям массовой концентрации титруемых кислот, остаточного экстракта, объемной доле этилового спирта, обусловленные как родовой принадлежностью дрожжей *non-Saccharomyces*, так и временем внесения дрожжей *S. cerevisiae* в бродящее суслу при совместном брожении. Массовая концентрация сахаров составляла менее 4,0 г/дм<sup>3</sup>, что соответствовало типу сухих сидров. Полученные данные представлены в таблице 1.

В контрольном образце, сброженном *S. cerevisiae*, отмечены наибольшая массовая концентрации титруемых кислот (6,7 г/дм<sup>3</sup>) и наименьшие значения pH (3,31), летучих кислот (0,13 г/дм<sup>3</sup>) и остаточного экстракта (12,7 г/дм<sup>3</sup>).

В образцах 8 и 12, изготовленных с применением *T. delbrueckii* и *M. pulcherrima*, объемная доля этилового спирта (5,8–6,0 %) была выше, чем в контрольном образце (5,6 %), тогда как в образце 4 (*L. thermotolerans*) этот показатель (5,7 %) находился на уровне контроля. Внесение *S. cerevisiae* через 72 ч в образцы 3, 7 и 11 способствовало формированию наименьшей объемной доли этилового спирта. Вероятно, это связано с тем, что дрожжи *non-Saccharomyces* за 3-е суток потребовали значительную часть сахаров, практически не продуцируя спирта или образуя его в меньшем количестве.

Показатель массовой концентрации остаточного экстракта в образцах сидра, сброженных монокультурами

Таблица 1. Физико-химические показатели экспериментальных образцов сидра ( $p < 0,05$ )Table 1. Physico-chemical parameters of experimental cider samples ( $p < 0.05$ )

| Вариант опыта                              | pH          | Объемная доля этилового спирта, % | Массовая концентрация, г/дм <sup>3</sup> |                   |             |                     |
|--------------------------------------------|-------------|-----------------------------------|------------------------------------------|-------------------|-------------|---------------------|
|                                            |             |                                   | Титруемые кислоты*                       | Летучие кислоты** | Сахара      | Остаточный экстракт |
| <i>Saccharomyces cerevisiae</i> (контроль) | 3,31 ± 0,12 | 5,6 ± 0,1                         | 6,70 ± 0,10                              | 0,13 ± 0,10       | 3,60 ± 0,20 | 12,7 ± 1,0          |
| <i>Lachancea thermotolerans</i>            |             |                                   |                                          |                   |             |                     |
| Образец 1                                  | 3,40 ± 0,14 | 5,5 ± 0,1                         | 4,60 ± 0,10                              | 0,78 ± 0,06       | 3,20 ± 0,20 | 15,4 ± 1,0          |
| Образец 2                                  | 3,49 ± 0,15 | 5,7 ± 0,1                         | 3,80 ± 0,10                              | 0,10 ± 0,06       | 3,00 ± 0,20 | 17,2 ± 1,0          |
| Образец 3                                  | 3,33 ± 0,14 | 4,5 ± 0,1                         | 4,30 ± 0,10                              | 0,15 ± 0,06       | 2,60 ± 0,20 | 14,9 ± 1,0          |
| Образец 4                                  | 3,34 ± 0,14 | 5,7 ± 0,1                         | 4,10 ± 0,10                              | 0,26 ± 0,06       | 2,80 ± 0,20 | 17,4 ± 1,0          |
| <i>Torulaspora delbrueckii</i>             |             |                                   |                                          |                   |             |                     |
| Образец 5                                  | 3,41 ± 0,15 | 5,6 ± 0,1                         | 4,30 ± 0,10                              | 0,46 ± 0,06       | 3,30 ± 0,20 | 14,8 ± 1,0          |
| Образец 6                                  | 3,69 ± 0,16 | 6,0 ± 0,1                         | 3,90 ± 0,10                              | 0,29 ± 0,06       | 3,50 ± 0,20 | 18,8 ± 1,0          |
| Образец 7                                  | 3,39 ± 0,14 | 4,4 ± 0,1                         | 5,40 ± 0,10                              | 0,53 ± 0,06       | 3,70 ± 0,20 | 17,1 ± 1,0          |
| Образец 8                                  | 3,35 ± 0,14 | 6,0 ± 0,1                         | 4,60 ± 0,10                              | 0,14 ± 0,06       | 3,20 ± 0,20 | 16,9 ± 1,0          |
| <i>Metschnikowia pulcherrima</i>           |             |                                   |                                          |                   |             |                     |
| Образец 9                                  | 3,82 ± 0,20 | 5,9 ± 0,1                         | 4,00 ± 0,10                              | 0,13 ± 0,06       | 3,50 ± 0,20 | 15,5 ± 1,0          |
| Образец 10                                 | 3,81 ± 0,18 | 5,8 ± 0,1                         | 4,00 ± 0,10                              | 0,37 ± 0,06       | 3,10 ± 0,20 | 16,8 ± 1,0          |
| Образец 11                                 | 3,75 ± 0,17 | 5,5 ± 0,1                         | 3,80 ± 0,10                              | 0,40 ± 0,06       | 3,50 ± 0,20 | 17,6 ± 1,0          |
| Образец 12                                 | 3,60 ± 0,16 | 5,8 ± 0,1                         | 4,20 ± 0,10                              | 0,18 ± 0,06       | 3,10 ± 0,20 | 18,5 ± 1,0          |

Примечание: \* – в пересчете на яблочную кислоту; \*\* – в пересчете на уксусную кислоту.

Note: \* – in terms of malic acid; \*\* – in terms of acetic acid.

*L. thermotolerans*, *T. delbrueckii* и *M. pulcherrima*, достигал наибольших значений по сравнению с контролем (17,4; 16,9 и 18,5 г/дм<sup>3</sup> соответственно). Полученные результаты можно объяснить способностью дрожжей поп-*Saccharomyces* синтезировать значительные количества вторичных метаболитов (глицерина, полисахаридов, высших спиртов, эфиров и др.), обуславливающих полноту, округлость и экстрактивность вкуса.

Значения массовой концентрации титруемых кислот существенно различались. Наименьшее содержание отмечено в образцах 9–12, изготовленных с применением *M. pulcherrima* (3,8–4,2 г/дм<sup>3</sup>). В образцах 4 и 8 (монокультуры *L. thermotolerans* и *T. delbrueckii*) значение данного показателя (4,1 и 4,6 г/дм<sup>3</sup> соответственно) были значительно ниже контрольного. Это свидетельствует о метаболической трансформации яблочной кислоты в молочную или другие соединения (включая эфиры) и о меньшем ее синтезе данными видами дрожжей.

Массовая концентрация летучих кислот (в пересчете на уксусную кислоту) не превышала допустимых значений по ГОСТ 31820-2015 и находилась в диапазоне 0,13–0,78 г/дм<sup>3</sup>.

Яблочная кислота является основной органической кислотой свежего яблочного сусла, ее начальная концентрация составляла 6,48 г/дм<sup>3</sup>. В значительно меньших концентрациях идентифицированы лимонная (0,25 г/дм<sup>3</sup>), янтарная (0,10 г/дм<sup>3</sup>) и молочная (0,10 г/дм<sup>3</sup>) кислоты. В процессе брожения состав органических

кислот изменялся. Выявлены значительные различия качественного и количественного состава органических кислот исследуемых образцов сидра, обусловленные как родовой принадлежностью дрожжей поп-*Saccharomyces*, так и временем внесения дрожжей *S. cerevisiae* при комбинированном брожении (рис. 2).

В контрольном образце, полученном путем сбраживания яблочного сусла дрожжами *S. cerevisiae*, массовая концентрация яблочной кислоты составляла 5,10 г/дм<sup>3</sup>; янтарной – 0,55 г/дм<sup>3</sup>; лимонной – 0,27 г/дм<sup>3</sup>; молочной – 0,31 г/дм<sup>3</sup>.

В образцах 3 (*L. thermotolerans* с внесением *S. cerevisiae* через 72 ч) и 4 (монокультура *L. thermotolerans*) яблочная кислота не обнаружена, что подтверждает способность данного вида к продукции молочной кислоты (3,30 и 3,33 г/дм<sup>3</sup> соответственно) из яблочной. Кроме того, в этих образцах содержание янтарной кислоты – мощного антиоксиданта – было наибольшим – 1,08 г/дм<sup>3</sup>. В образце 1 (с внесением *S. cerevisiae* через 24 ч) концентрация яблочной кислоты сохранилась на уровне 4,49 г/дм<sup>3</sup>, при этом содержание молочной кислоты было наименьшим в серии образцов с *L. thermotolerans* – 0,28 г/дм<sup>3</sup>. При увеличении интервала внесения *S. cerevisiae* до 48 ч (образец 2) концентрация яблочной кислоты возрастала до 5,11 г/дм<sup>3</sup>, молочной – до 0,36 г/дм<sup>3</sup>. Внесение в яблочное сусло дрожжей *S. cerevisiae* через 24 и 48 ч (образцы 1 и 2) после инокуляции не позволило дрожжам *L. thermotolerans* пол-

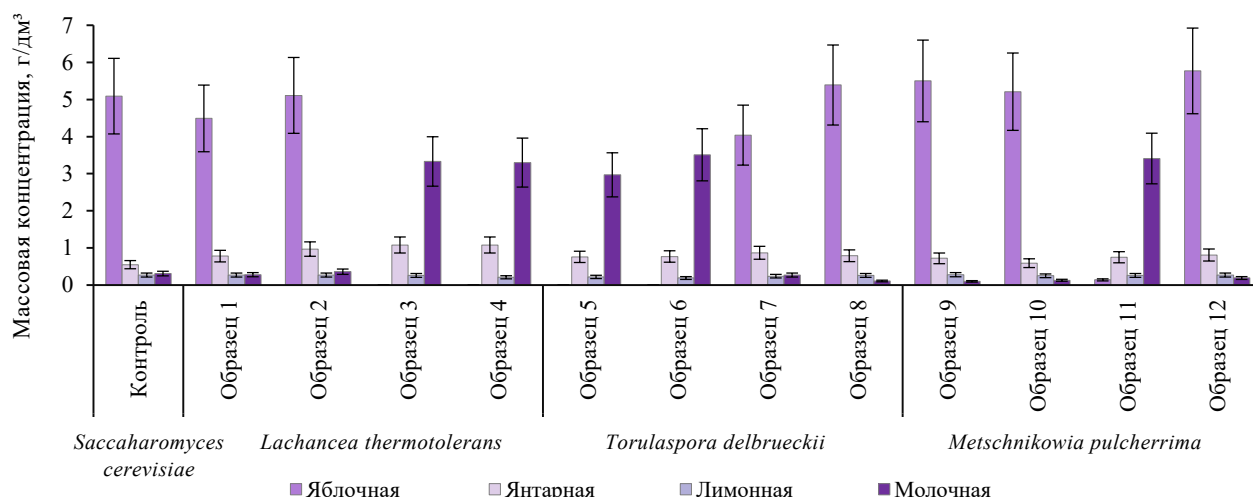


Рисунок 2. Содержание органических кислот в экспериментальных образцах сидра

Figure 2. Organic acid content in experimental cider samples

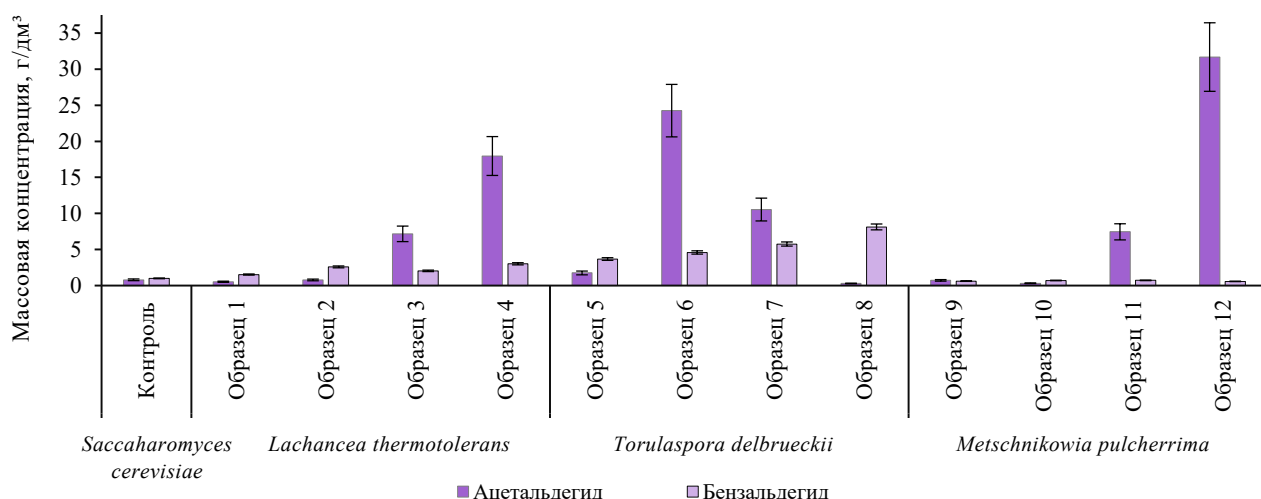


Рисунок 3. Содержание ацетальдегида и бензальдегида в экспериментальных образцах сидра

Figure 3. Mass concentration of acetaldehyde and benzaldehyde in experimental cider samples

ностью трансформировать яблочную кислоту и реализовать свой метаболический потенциал.

В образце 8 (монокультура *T. delbrueckii*) концентрация яблочной кислоты достигла 5,39 г/дм³, молочной – 0,11 г/дм³. В образце 7 (с внесением *S. cerevisiae* через 72 ч) концентрация яблочной кислоты также была достаточно высокой (4,04 г/дм³), а молочной – низкой (0,27 г/дм³). Однако в образцах 5 и 6 (с внесением *S. cerevisiae* через 24 и 48 ч соответственно) яблочная кислота полностью трансформировалась в молочную (до 2,97 и 3,51 г/дм³ соответственно). Поскольку ни *T. delbrueckii*, ни *S. cerevisiae* по отдельности не обладают способностью продуцировать молочную кислоту в значительных количествах, вероятно, полученные результаты обусловлены взаимодействием двух видов дрожжей в условиях последовательной инокуляции, механизм который требует дальнейшего изучения.

В образце 12 (монокультура *M. pulcherrima*) концентрация яблочной кислоты составила 5,77 г/дм³; молочной – 0,19 г/дм³; янтарной – 0,81 г/дм³. В образцах 9 и 10 (с внесением *S. cerevisiae* через 24 и 48 ч соответственно) соотношение органических кислот было аналогичным образцу 12. Однако в образце 11 (с внесением *S. cerevisiae* через 72 ч) концентрация яблочной кислоты была наименьшей (0,14 г/дм³), а молочной – наибольшей (3,41 г/дм³). Очевидно, монокультура *M. pulcherrima* способна потребить часть яблочной кислоты в течение 72 ч.

Стоит отметить, что на концентрацию лимонной кислоты не оказывали влияния ни род дрожжей *Saccharomyces*, ни время внесения *S. cerevisiae*. Ее содержание варьировалось в диапазоне 0,19–0,27 г/дм³.

В результате анализа легколетучих компонентов в образцах сидра обнаружено 28 соединений (рис. 3).



Эти компоненты в большей степени образуются в процессе брожения и являются основными веществами, обуславливающими ароматические характеристики сидра. Основные группы – сложные эфиры, высшие спирты, летучие кислоты, альдегиды и кетоны. Суммарное содержание легколетучих компонентов в образцах варьировалось в пределах от 500 до 2500 мг/дм<sup>3</sup>.

Результаты исследования летучих веществ исследуемых образцов сидров представлены в таблице 2.

Высшие спирты образуются по пути Эрлиха из аминокислот и являются важными компонентами аромата, придающими сидру фруктовые, цветочные и растительные тона в небольших концентрациях, в высоких – сивушные и спиртовые запахи.

Основным компонентом в группе высших спиртов, идентифицированным во всех образцах сидра, был изоамилол (3-метилбутан-1-ол). Его концентрация варьировала в диапазоне от 128 до 252 мг/дм<sup>3</sup>: наибольшее содержание отмечено в образце 8 (монокультура *T. delbrueckii* – 252 мг/дм<sup>3</sup>), наименьшее – в образце 3 (*L. thermotolerans* с внесением *S. cerevisiae* через 72 ч – 128 мг/дм<sup>3</sup>). Выявлена отрицательная корреляционная связь между массовой концентрацией изоамилола и дегустационной оценкой образцов сидра. Коэффициент корреляции Пирсона составил  $r = -0,32$ , что по шкале Чеддока соответствует умеренной тесноте связи. Так, дегустационная оценка образца 8 составила 7,3 балла, образца 3 – 7,7 баллов. Следует отметить, что массовая концентрация изобутанола в контрольном образце была на уровне 218 мг/дм<sup>3</sup>. Изобутанол также присутствовал во всех образцах сидра, его концентрация составила от 29 до 65 мг/дм<sup>3</sup>, причем наибольшее содержание отмечено в образцах 5–12, изготовленных с применением дрожжей *T. delbrueckii* и *M. pulcherrima*. В контрольном образце массовая концентрация 1-пропанола достигала наибольшего значения (67 мг/дм<sup>3</sup>), тогда

как в опытных образцах его содержание было ниже (24–50 мг/дм<sup>3</sup>). Гексанол, обуславливающий растительные оттенки в аромате, максимально накапливался в образцах 1 и 2 (*L. thermotolerans* – 48 и 24 мг/дм<sup>3</sup> соответственно) и в образцах 9 и 10 (*M. pulcherrima* – 19 и 15 мг/дм<sup>3</sup> соответственно), тогда как в контрольном образце его содержание составляло всего 2 мг/дм<sup>3</sup>. В аромате данных образцов отмечены растительные тона.

Летучие жирные кислоты приносят в аромат сидров сливочные, маслянистые и другие тона. Основной в группе летучих кислот была уксусная, в меньших концентрациях обнаружена пропионовая. Содержание изомасляной, масляной, изовалериановой и валериановой кислот было примерно на одном уровне и не зависело ни от рода дрожжей non-*Saccharomyces*, ни от времени внесения *S. cerevisiae* при комбинированном брожении.

Ацетальдегид – ключевой промежуточный метаболит спиртового брожения, в концентрации до 100 мг/дм<sup>3</sup> он придает аромату сидра фруктовые (зеленого яблока) тона. Кроме того, ацетальдегид служит маркером окисленности. Наибольшее содержание ацетальдегида отмечено в образце 12 (монокультура *M. pulcherrima*) – 32 мг/дм<sup>3</sup>, что значительно превышало значение в контрольном образце (0,8 мг/дм<sup>3</sup>). В аромате образца 12 отмечены оттенки свежего яблока и белых ягод. В серии образцов, изготовленных с применением *L. thermotolerans*, в образце 4 (монокультура *L. thermotolerans*) концентрация ацетальдегида – 18 мг/дм<sup>3</sup>, в то время как в образцах 1–3 его содержание находилось на уровне 0,5–7,0 мг/дм<sup>3</sup>. В серии образцов сидра, изготовленных с применением *T. delbrueckii*, выделился образец 6 (с внесением *S. cerevisiae* через 48 ч), в котором концентрация ацетальдегида достигла 44 мг/дм<sup>3</sup> (рис. 4).

Наибольшие концентрации бензальдегида, определяющего ореховые тона в аромате сидра, отмечены

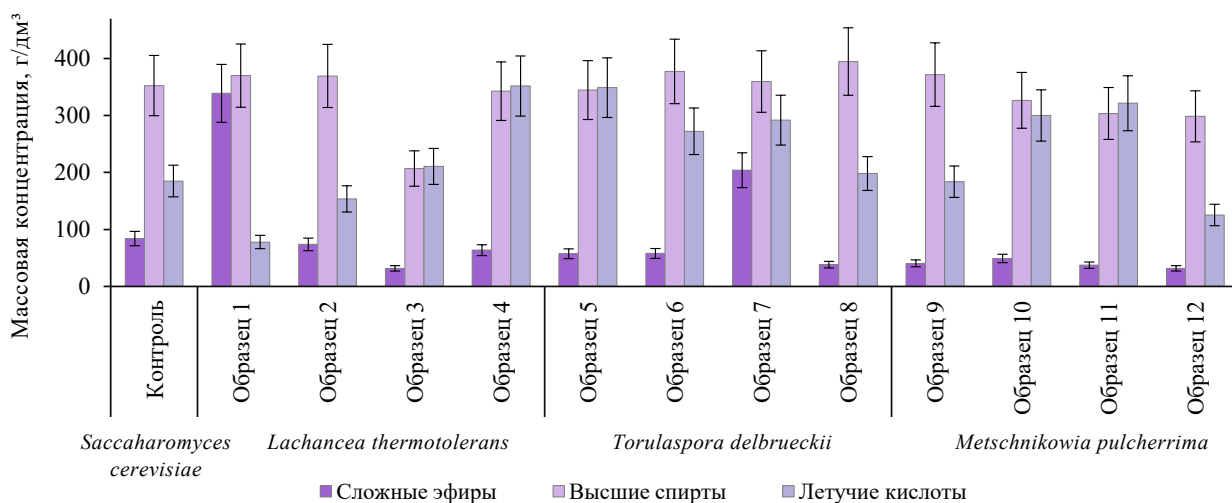


Рисунок 4. Содержание сложных эфиров, высших спиртов и летучих кислот в экспериментальных образцах сидра

Figure 4. Esters, higher alcohols, and volatile acids in experimental cider samples

Таблица 2. Содержание основных групп летучих компонентов в экспериментальных образцах сидра, мг/дм<sup>3</sup> ( $p < 0,05$ )  
Table 2. Volatile components in experimental cider samples, mg/dm<sup>3</sup> ( $p < 0,05$ )

| Компонент /<br>Группа      | Saccharomyces<br>cerevisiae<br>(контроль) | Образцы сидра, сброженные штаммами дрожжей |              |              |              |                         |              |              |              |                           |              |              |              |
|----------------------------|-------------------------------------------|--------------------------------------------|--------------|--------------|--------------|-------------------------|--------------|--------------|--------------|---------------------------|--------------|--------------|--------------|
|                            |                                           | Lachancea thermotolerans                   |              |              |              | Torulaspora delbrueckii |              |              |              | Metschnikowia pulcherrima |              |              |              |
|                            |                                           | Образец 1                                  | Образец 2    | Образец 3    | Образец 4    | Образец 5               | Образец 6    | Образец 7    | Образец 8    | Образец 9                 | Образец 10   | Образец 11   | Образец 12   |
| Сложные эфиры              |                                           |                                            |              |              |              |                         |              |              |              |                           |              |              |              |
| Этилформиат                | менее 0,5                                 | 3,0 ± 1,0                                  | 1,0 ± 0,2    | менее 0,5    | менее 0,5    | менее 0,5               | 1,0 ± 0,2    | 0,6 ± 0,1    | 1,0 ± 0,2    | 0,5 ± 0,1                 | менее 0,5    | 1,0 ± 0,2    | 1,0 ± 0,2    |
| Метилацетат                | 1,0 ± 0,2                                 | 4,0 ± 1,0                                  | 2,0 ± 1,0    | менее 0,5    | менее 0,5    | 9,0 ± 1,0               | 12,0 ± 2,0   | 0,7 ± 0,1    | 1,0 ± 0,2    | 0,6 ± 0,1                 | 0,5 ± 0,1    | 2,0 ± 1,0    | 2,0 ± 1,0    |
| Этилацетат                 | 55,0 ± 7,0                                | 307,0 ± 46,0                               | 43,0 ± 6,0   | 13,0 ± 2,0   | 36,0 ± 5,0   | 23,0 ± 14,0             | 20,0 ± 3,0   | 183,0 ± 27,0 | 29,0 ± 4,0   | 18,0 ± 3,0                | 15,0 ± 2,0   | 20,0 ± 3,0   | 20,0 ± 3,0   |
| Этиллактат                 | 28,0 ± 3,0                                | 19,0 ± 3,0                                 | 23,0 ± 3,0   | 14,0 ± 2,0   | 22,0 ± 3,0   | 20,0 ± 13,0             | 21,0 ± 3,0   | 15,0 ± 2,0   | 6,0 ± 1,0    | 13,0 ± 2,0                | 19,0 ± 3,0   | 17,0 ± 3,0   | 6,0 ± 1,0    |
| Этилоктаноат               | менее 0,5                                 | менее 0,5                                  | 1,0 ± 0,2    | 2,0 ± 1,0    | 3,0 ± 1,0    | 2,0 ± 1,0               | 1,0 ± 0,2    | 0,8 ± 0,1    | 0,7 ± 0,1    | 2,0 ± 1,0                 | 4,0 ± 1,0    | менее 0,5    | 4,0 ± 1,0    |
| Этилдеcanoат               | менее 0,5                                 | 2,0 ± 1,0                                  | 2,0 ± 1,0    | 2,0 ± 1,0    | 2,0 ± 1,0    | 1,0 ± 0,2               | 1,0 ± 0,2    | менее 0,5    | менее 0,5    | 2,0 ± 1,0                 | 2,0 ± 1,0    | менее 0,5    | менее 0,5    |
| Этиллаурат                 | менее 0,5                                 | 4,0 ± 1,0                                  | 3,0 ± 1,0    | 2,0 ± 1,0    | 2,0 ± 1,0    | 2,0 ± 1,0               | 2,0 ± 1,0    | 3,0 ± 1,0    | 2,0 ± 1,0    | 5,0 ± 1,0                 | 3,0 ± 1,0    | 4,0 ± 1,0    | менее 0,5    |
| Высшие спирты              |                                           |                                            |              |              |              |                         |              |              |              |                           |              |              |              |
| 2-пропанол                 | менее 0,5                                 | 4,0 ± 1,0                                  | 3,0 ± 1,0    | 3,0 ± 1,0    | 4,0 ± 1,0    | 9,0 ± 1,0               | 1,0 ± 0,2    | 2,0 ± 1,0    | 2,0 ± 1,0    | 4,0 ± 1,0                 | 3,0 ± 1,0    | 2,0 ± 1,0    | 3,0 ± 1,0    |
| 1-пропанол                 | 67,0 ± 8,0                                | 42,0 ± 6,0                                 | 36,0 ± 5,0   | 24,0 ± 4,0   | 40,0 ± 16,0  | 50,0 ± 7,0              | 49,0 ± 7,0   | 35,0 ± 5,0   | 50,0 ± 7,0   | 44,0 ± 7,0                | 30,0 ± 4,0   | 33,0 ± 5,0   | 35,0 ± 5,0   |
| Изобутанол                 | 43,0 ± 5,0                                | 37,0 ± 6,0                                 | 46,0 ± 7,0   | 29,0 ± 4,0   | 49,0 ± 7,0   | 45,0 ± 7,0              | 57,0 ± 9,0   | 65,0 ± 10,0  | 61,0 ± 9,0   | 50,0 ± 7,0                | 58,0 ± 9,0   | 60,0 ± 9,0   | 63,0 ± 10,0  |
| 1-бутанол                  | 22,0 ± 3,0                                | 20,0 ± 3,0                                 | 22,0 ± 3,0   | 15,0 ± 2,0   | 23,0 ± 3,0   | 23,0 ± 4,0              | 23,0 ± 3,0   | 19,0 ± 3,0   | 23,0 ± 3,0   | 24,0 ± 4,0                | 21,0 ± 3,0   | 23,0 ± 3,0   | 21,0 ± 3,0   |
| Изоамилол                  | 218,0 ± 26,0                              | 219,0 ± 33,0                               | 238,0 ± 36,0 | 128,0 ± 19,0 | 216,0 ± 32,0 | 212,0 ± 32,0            | 241,0 ± 36,0 | 237,0 ± 36,0 | 252,0 ± 38,0 | 231,0 ± 35,0              | 200,0 ± 30,0 | 178,0 ± 27,0 | 174,0 ± 26,0 |
| 1-пентанол                 | 0,5 ± 0,1                                 | 0,5 ± 0,1                                  | 0,6 ± 0,1    | менее 0,5    | 0,5 ± 0,1    | менее 0,5               | 0,5 ± 0,1    | менее 0,5    | 0,5 ± 0,1    | 0,5 ± 0,1                 | 0,5 ± 0,1    | 0,6 ± 0,1    | 0,4 ± 0,1    |
| Гексанол                   | 2,0 ± 1,0                                 | 48,0 ± 7,0                                 | 24,0 ± 4,0   | 9,0 ± 1,0    | 10,0 ± 2,0   | 6,0 ± 1,0               | 7,0 ± 1,0    | 2,0 ± 1,0    | 7,0 ± 1,0    | 19,0 ± 3,0                | 15,0 ± 2,0   | 7,0 ± 1,0    | 2,0 ± 1,0    |
| Ароматические спирты       |                                           |                                            |              |              |              |                         |              |              |              |                           |              |              |              |
| Фенилэтанол                | 12,0 ± 2,0                                | 16,0 ± 3,0                                 | 23,0 ± 3,0   | 18,0 ± 3,0   | 21,0 ± 3,0   | 16,0 ± 3,0              | 20,0 ± 3,0   | 31,0 ± 5,0   | 20,0 ± 3,0   | 16,0 ± 3,0                | 14,0 ± 3,0   | 14,0 ± 3,0   | 14,0 ± 3,0   |
| Летучие кислоты            |                                           |                                            |              |              |              |                         |              |              |              |                           |              |              |              |
| Уксусная кислота           | 120,0 ± 16,0                              | 218,0 ± 33,0                               | 92,0 ± 14,0  | 136,0 ± 20,0 | 239,0 ± 36,0 | 224,0 ± 34,0            | 204,0 ± 31,0 | 224,0 ± 34,0 | 129,0 ± 19,0 | 117,0 ± 18,0              | 236,0 ± 35,0 | 252,0 ± 38,0 | 81,0 ± 12,0  |
| Пропионовая<br>кислота     | 45,0 ± 5,0                                | 44,0 ± 7,0                                 | 47,0 ± 7,0   | 57,0 ± 9,0   | 89,0 ± 13,0  | 104,0 ± 16,0            | 45,0 ± 7,0   | 34,0 ± 5,0   | 37,0 ± 6,0   | 51,0 ± 8,0                | 54,0 ± 8,0   | 58,0 ± 9,0   | 34,0 ± 5,0   |
| Изомасляная<br>кислота     | 7,0 ± 1,0                                 | 4,0 ± 1,0                                  | 6,0 ± 1,0    | 5,0 ± 1,0    | 7,0 ± 1,0    | 9,0 ± 1,0               | 11,0 ± 2,0   | 13,0 ± 2,0   | 19,0 ± 3,0   | 1,0 ± 0,2                 | 2,0 ± 1,0    | 2,0 ± 1,0    | 1,0 ± 0,2    |
| Масляная<br>кислота        | 5,0 ± 1,0                                 | 2,0 ± 1,0                                  | 2,0 ± 1,0    | 7,0 ± 1,0    | 9,0 ± 1,0    | 6,0 ± 1,0               | 3,0 ± 1,0    | 4,0 ± 1,0    | 3,0 ± 1,0    | 8,0 ± 1,0                 | 3,0 ± 1,0    | 4,0 ± 1,0    | 6,0 ± 1,0    |
| Изовалериановая<br>кислота | 6,0 ± 1,0                                 | 4,0 ± 1,0                                  | 2,0 ± 1,0    | 2,0 ± 1,0    | 2,0 ± 1,0    | 2,0 ± 1,0               | 3,0 ± 1,0    | 9,0 ± 1,0    | 4,0 ± 1,0    | 2,0 ± 1,0                 | 2,0 ± 1,0    | 2,0 ± 1,0    | 1,0 ± 1,0    |
| Валериановая<br>кислота    | 2,0 ± 1,0                                 | 3,0 ± 1,0                                  | 4,0 ± 1,0    | 4,0 ± 1,0    | 5,0 ± 1,0    | 4,0 ± 1,0               | 6,0 ± 1,0    | 6,0 ± 1,0    | 6,0 ± 1,0    | 4,0 ± 1,0                 | 4,0 ± 1,0    | 4,0 ± 1,0    | 2,0 ± 1,0    |
| Альдегиды                  |                                           |                                            |              |              |              |                         |              |              |              |                           |              |              |              |
| Фурфурол                   | 3,0 ± 1,0                                 | 1,0 ± 0,2                                  | 1,0 ± 0,2    | 2,0 ± 1,0    | 3,0 ± 1,0    | 0,9 ± 0,1               | 0,9 ± 0,1    | 3,0 ± 1,0    | 0,9 ± 0,1    | 0,6 ± 0,1                 | 0,7 ± 0,1    | 0,7 ± 0,1    | 0,6 ± 0,1    |

в образцах 5–8, изготовленных с применением *T. delbrueckii* (4–8 мг/дм<sup>3</sup>), тогда как в сериях образцов с *L. thermotolerans* и *M. pulcherrima* его содержание было значительно ниже.

Эфиры представляют собой важнейшую группу ароматообразующих соединений, ответственную за фруктовые, цветочные и ягодные тона в сидре. Наиболее значимые различия выявлены в концентрациях этилацетата, который при высоком содержании вносит в аромат сидра тона растворителя и клея, а в умеренных – фруктовые оттенки. В образце 4 (монокультура *L. thermotolerans*) его содержание составило 36 мг/дм<sup>3</sup>, что ниже, чем в контрольном образце (55 мг/дм<sup>3</sup>). Однако в образце 1 (с внесением *S. cerevisiae* через 24 ч) и образце 7 (*T. delbrueckii* с внесением *S. cerevisiae* через 72 ч) содержание этилацетата было более чем в 4 раза выше контроля. Выявлена умеренная положительная корреляция между содержанием этилацетата и уксусной кислоты ( $r = 0,34$  по Пирсону, шкала Чеддока), что указывает на активацию метаболического пути ацетил-КоА.

Этиллактат, образующийся при взаимодействии этанола с молочной кислотой и определяющий присутствие сливочных и карамельных тонов в аромате, идентифицирован во всех образцах на уровне 6–28 мг/дм<sup>3</sup>, причем максимальные значения отмечены в контроле и в образцах 1–4 (с *L. thermotolerans*), что коррелирует с массовой концентрацией молочной кислоты в этих образцах. Этиловые эфиры жирных кислот (этилоктаноат, этилдеcanoат, этиллаурат), также определяющие присутствие фруктовых и мыльных (в высоких концентрациях) тонов, обнаружены в следовых количествах.

Наибольшие концентрации фенилэтанола, придающего цветочные ароматы, идентифицированы в образ-

цах 1–4 (*L. thermotolerans* – 16–23 мг/дм<sup>3</sup>) и образцах 5–8 (*T. delbrueckii* – 16–31 мг/дм<sup>3</sup>), что превышало его содержание в контрольном образце (12 мг/дм<sup>3</sup>).

Органолептическая оценка является важным критерием качества готовой продукции. При анализе внешнего вида потребитель в первую очередь обращает внимание на цвет напитка и формирует первое впечатление о нем. Кроме того, цвет сидра может служить показателем степени протекания окислительных процессов (рис. 5). Проведена оценка цветовых характеристик готовых образцов сидров по оптической плотности при длинах волн 420 (желтый), 520 (красный) и 620 (синий) нм, а также по оптической плотности при длинах волн 450, 570 и 630 нм. На основании полученных значений рассчитаны интегральные показатели: интенсивность цвета ( $I$ ), выраженная как сумма поглощений длин волн ( $I = D_{420} + D_{520} + D_{620}$ ), и оттенок цвета ( $N$ ), рассчитанный как соотношение поглощения при длинах волн 420 и 520 нм ( $N = D_{420} : D_{520}$ ). Полученные данные представлены в таблице 3.

Контрольный образец (К), сброженный *S. cerevisiae*, характеризовался умеренной интенсивностью цвета ( $I = 0,765$ ) и выраженным преобладанием желтых тонов ( $N = 2,93$ ), что значительно выше порогового значения 2,50, указывающего на доминирование желто-золотистой гаммы.

В образцах 4, 8, 12, изготовленных с применением монокультур дрожжей *non-Saccharomyces*, выявлены различия в цветовых характеристиках в зависимости от вида дрожжей (рис. 5)

Наиболее интенсивным цветом обладал образец 9 (*M. pulcherrima* с внесением *S. cerevisiae* через 24 ч) –  $I = 1,202$ , что в 1,6 раз выше аналогичного значения контроля, при тоне оттенка 2,60 – в пределах желтой

Таблица 3. Оптическая плотность и интегральные цветовые показатели в экспериментальных образцах сидра ( $p < 0,05$ )

Table 3. Optical density and integral color parameters in experimental cider samples ( $p < 0.05$ )

| Вариант опыта                                 | Оптическая плотность при длине волны, нм |       |       | Интегральные цветовые показатели |       |
|-----------------------------------------------|------------------------------------------|-------|-------|----------------------------------|-------|
|                                               | D420                                     | D520  | D620  | $I$                              | $N$   |
| <i>Saccharomyces cerevisiae</i><br>(контроль) | 0,489                                    | 0,167 | 0,109 | 0,765                            | 2,930 |
| <i>Lachancea thermotolerans</i>               |                                          |       |       |                                  |       |
| Образец 1                                     | 0,223                                    | 0,072 | 0,045 | 0,340                            | 3,100 |
| Образец 2                                     | 0,367                                    | 0,114 | 0,073 | 0,554                            | 3,220 |
| Образец 3                                     | 0,502                                    | 0,216 | 0,158 | 0,876                            | 2,320 |
| Образец 4                                     | 0,433                                    | 0,145 | 0,087 | 0,665                            | 2,990 |
| <i>Torulaspora delbrueckii</i>                |                                          |       |       |                                  |       |
| Образец 5                                     | 0,574                                    | 0,245 | 0,163 | 0,982                            | 2,340 |
| Образец 6                                     | 0,987                                    | 0,470 | 0,305 | 1,762                            | 2,100 |
| Образец 7                                     | 0,531                                    | 0,198 | 0,127 | 0,856                            | 2,680 |
| Образец 8                                     | 0,629                                    | 0,209 | 0,130 | 0,968                            | 3,010 |
| <i>Metschnikowia pulcherrima</i>              |                                          |       |       |                                  |       |
| Образец 9                                     | 0,747                                    | 0,287 | 0,168 | 1,202                            | 2,600 |
| Образец 10                                    | 0,660                                    | 0,261 | 0,164 | 1,085                            | 2,530 |
| Образец 11                                    | 0,600                                    | 0,254 | 0,170 | 1,024                            | 2,360 |
| Образец 12                                    | 0,623                                    | 0,241 | 0,153 | 1,017                            | 2,580 |

доминанты, но с заметным сдвигом в сторону красной компоненты по сравнению с контролем. Образец, изготовленный с применением монокультуры *T. delbrueckii*, имел более высокое значение интенсивности ( $I = 0,968$ ), чем контрольный, при тоне 3,01 – наибольшем значении среди образцов с монокультурами дрожжей *pop-Saccharomyces*, что указывает на чисто желтый оттенок. Образец 4 (монокультура *L. thermotolerans*), напротив, характеризовался наименьшей интенсивностью цвета ( $I = 0,665$ , ниже контроля) с наибольшим значением тона – 2,99.

В результате изучения цветовых характеристик опытных образцов 1–3, изготовленных с применением *L. thermotolerans* и *S. cerevisiae*, установлена зависимость интенсивности цвета от времени внесения *S. cerevisiae* в бродящее яблочное сусло при комбинированном брожении.

Наименьшее значение интенсивности цвета отмечено в образце 1 ( $I = 0,340$ ) – более чем вдвое ниже контрольного. Оттенок цвета (3,10) указывает на чистый желтый цвет без красноватых оттенков. Оптическая плотность достигала наименьших значений (0,489; 0,167; 0,109) при разных длинах волны, что свидетельствует об исключительно светлом (телесном) цвете данного образца сидра. С увеличением времени внесения *S. cerevisiae* до 48 ч (образец 2) интенсивность цвета возрастала ( $I = 0,554$ ), значение оттенка цвета оставалось высоким (3,22 – максимальное значение в выборке). В образце 3 (внесение *S. cerevisiae* через 72 ч) значение интенсивности цвета было выше ( $I = 0,876$ ), чем в образце 4 (монокультура *L. thermotolerans*,  $I = 0,665$ ), приближаясь к контрольному уровню, однако оттенок цвета снижался до 2,32 – впервые в этой серии опускался ниже 2,50, что указывает на появление выраженной красной компоненты.

Таким образом, внесение дрожжей *S. cerevisiae* через 24 ч приводит к формированию более светлого напитка, который характеризуется чистым желтым тоном, тогда как увеличение интервала внесения

в образцы до 72 ч способствует проявлению красноватого оттенка готового напитка.

Среди образцов 5–7, изготовленных с применением *T. delbrueckii*, отмечен образец 6 (с внесением в бродящее яблочное сусло *S. cerevisiae* через 48 ч). Значение интенсивности цвета ( $I = 1,762$ ) в 2,3 раза превышало значения контроля и в 1,8 раза – образца с монокультурой *T. delbrueckii*, при этом значение оттенка цвета (2,10) было наименьшим в данной группе, что указывает на доминирование красной компоненты в оттенке. Цвет данного образца характеризовался темно-янтарным или коричневато-красным оттенком, что, вероятно, связано с метаболическим взаимодействием двух видов дрожжей, которое способствовало накоплению продуктов конденсации полифенолов.

Образцы 9–11 (изготовленные с *M. pulcherrima*) имели интенсивность цвета несколько ниже (1,017–1,085), чем образец с монокультурой *M. pulcherrima* (1,202), но существенно выше контроля (0,765). Наименьшее значение интенсивности цвета в серии зафиксировано в образце 11 (с внесением *S. cerevisiae* через 72 ч; 1,017), наибольшее – в образце 9 (с внесением *S. cerevisiae* через 24 ч; 1,085). Оттенок цвета варьировал в диапазоне от 2,36 до 2,58, причем наименьшее значение (наибольший вклад красной компоненты) отмечено в образце 10 (внесение через 48 ч; 2,36).

Время внесения дрожжей *S. cerevisiae* в бродящее сусло при смешанном брожении при последовательной инокуляции влияет как на интенсивность, так и на оттенок цвета готового сидра.

Результаты органолептического анализа, проведенного дегустационной комиссией по 10-балльной шкале с оценкой внешнего вида, аромата и вкуса, представлены в таблице 4. Дегустационная оценка контрольного образца, полученного с применением дрожжей *S. cerevisiae*, составила 7,6 баллов.

Наивысшую оценку дегустаторов – 7,7 балла – получил образец 10 (*M. pulcherrima* с внесением *S. cerevisiae* через 48 ч). Данный образец характеризовался



Рисунок 5. Внешний вид экспериментальных образцов сидра: 1 – образец 1; 2 – образец 2; 3 – образец 3; 4 – образец 4; 5 – образец 5; 6 – образец 6; 7 – образец 7; 8 – образец 8; 9 – образец 9; 10 – образец 10; 11 – образец 11; 12 – образец 12; К – контрольный образец

Figure 5. Appearance of experimental cider samples: 1 – sample 1; 2 – sample 2; 3 – sample 3; 4 – sample 4; 5 – sample 5; 6 – sample 6; 7 – sample 7; 8 – sample 8; 9 – sample 9; 10 – sample 10; 11 – sample 11; 12 – sample 12; and K – control



Таблица 4. Органолептическая оценка готовых сидров ( $p < 0,05$ )Table 4. Sensory profiles of finished ciders ( $p < 0.05$ )

| Вариант опыта                              | Внешний вид                                                             | Аромат                                                                                        | Вкус                                                         | Дегустационный балл |
|--------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|---------------------|
| <i>Saccharomyces cerevisiae</i> (контроль) | Прозрачный, светло-соломенный цвет с золотистым оттенком                | Фруктовый с оттенками яблока и груши                                                          | Чистый, с продолжительным послевкусием                       | 7,6                 |
| <i>Lachancea thermotolerans</i>            |                                                                         |                                                                                               |                                                              |                     |
| Образец 1                                  | Прозрачный, светло-соломенный цвет с зеленым оттенком                   | Фруктовый с растительными тонами                                                              | Округлый, гармоничный, экстрактивный                         | 7,5                 |
| Образец 2                                  | Прозрачный, светло-соломенный цвет с зеленым оттенком                   | Чистый, тонкий с фруктовыми и растительными оттенками, тонами подлеска                        | Чистый, гармоничный, умеренно свежий                         | 7,5                 |
| Образец 3                                  | Прозрачный, светло-соломенный цвет с зеленым оттенком                   | Чистый, сложный с фруктовыми и сливочными тонами, оттенками свежего и печеного яблока         | Чистый, гармоничный с легкой горчинкой                       | 7,6                 |
| Образец 4                                  | Непрозрачный с легкой опалесценцией, соломенный цвет с зеленым оттенком | Фруктовый с растительными тонами                                                              | Чистый, простой, экстрактивный                               | 7,4                 |
| <i>Torulaspora delbrueckii</i>             |                                                                         |                                                                                               |                                                              |                     |
| Образец 5                                  | Прозрачный, светло-соломенный цвет с зеленым оттенком                   | Фруктовый с растительными тонами, оттенками алычи и скотного двора                            | Экстрактивный, свежий с растительными тонами, оттенками кожи | 7,3                 |
| Образец 6                                  | Прозрачный, соломенный цвет с янтарным оттенком                         | Чистый, сложный, фруктовый с цветочными и сливочными тонами, оттенками подлеска и сухофруктов | Чистый, округлый, простой                                    | 7,5                 |
| Образец 7                                  | Прозрачный, соломенный цвет с зеленым оттенком                          | Фруктовый с тонами моченых фруктов                                                            | Чистый, резкий                                               | 7,3                 |
| Образец 8                                  | Непрозрачный с легкой опалесценцией, соломенный цвет с зеленым оттенком | Чистый, тонкий, фруктовый с оттенками цветущих деревьев и душистого перца                     | Чистый, умеренно свежий, простой с легкой горчинкой          | 7,5                 |
| <i>Metschnikowia pulcherrima</i>           |                                                                         |                                                                                               |                                                              |                     |
| Образец 9                                  | Прозрачный, соломенный цвет с зеленым оттенком                          | Чистый, фруктовый с растительными оттенками, легкими тонами печеного яблока и грибов          | Чистый, округлый, фруктовый                                  | 7,6                 |
| Образец 10                                 | Прозрачный, соломенный цвет с зеленым оттенком                          | Чистый, сложный, фруктовый с растительными, сливочными, пряными и сухофруктовыми оттенками    | Чистый, полный, округлый, гармоничный, глицеринистый         | 7,7                 |
| Образец 11                                 | Прозрачный, соломенный цвет с зеленым оттенком                          | Чистый, фруктовый с легкими сливочными и йогуртовыми оттенками                                | Чистый, простой                                              | 7,4                 |
| Образец 12                                 | Прозрачный, лимонный цвет                                               | Чистый, фруктовый с растительными оттенками, тонами свежего яблока и белых ягод               | Чистый, полный, гармоничный, умеренно свежий                 | 7,6                 |

сложным ярким ароматом с фруктовыми, растительными, сливочными, пряными и сухофруктовыми оттенками, а также гармоничным, полным и округлым вкусом, что обусловлено присутствием сложных эфиров (этилацетата, метилацетата, этиллактата, этилоканоата, этилдеcanoата и этиллаурата), оптимальным содержанием высших спиртов и молочной кислоты. Чуть ниже (7,6 балла) оценены образцы 9 и 12 (также с *M. pulcherrima*) и образец 3 (с *L. thermotolerans*).

В группе образцов, полученных с применением *L. thermotolerans* (1–3), дегустационная оценка повышалась с увеличением времени внесения в яблочное сусло *S. cerevisiae*. В аромате данных образцов присутствовали фруктовые, растительные тона, оттенки поддеска, свежего и печеного яблока, а также чистый гармоничный вкус. Наличие сливочных оттенков в аромате образца 3 коррелирует с накоплением молочной кислоты и, возможно, масляной и изовалериановой летучих кислот. Образец, изготовленный с применением монокультуры *L. thermotolerans*, получил более низкую оценку в данной группе (7,4 балла) и характеризовался простым, но экстрактивным вкусом.

В группе образцов с *T. delbrueckii* отмечены образцы 6 и 8 (по 7,5 балла). Образец 6 (смешанное брожение с внесением *S. cerevisiae* через 48 ч) обладал чистым сложным ароматом с фруктовыми, цветочными и сливочными тонами, оттенками поддеска и сухофруктов, а также чистым округлым вкусом. Содержание метилацетата, этилацетата и этиллактата в данном образце составляло 12; 20 и 21 мг/дм<sup>3</sup> соответственно, установлено наибольшее значение интенсивности цвета ( $I = 1,762$ ). Образец 8 (монокультура *T. delbrueckii*) характеризовался чистым тонким ароматом с оттенками цветущих деревьев и душистого перца, умеренно свежим вкусом с легкой приятной горчинкой.

## Выводы

В результате изучения динамики брожения яблочного сусла, сбраживаемого монокультурами дрожжей non-*Saccharomyces*, установлено, что процесс брожения под действием их ферментных систем протекает медленнее (в среднем на 5 суток), чем под действием *Saccharomyces cerevisiae*. В сидрах, изготовленных с применением non-*Saccharomyces*, массовая концентрация титруемых кислот и сахаров была ниже на 14–22

и 31–39 % соответственно, а остаточного экстракта – выше на 33–46 % по сравнению с сидром, изготовленным с применением *S. cerevisiae*. Последовательная инокуляция non-*Saccharomyces* и *S. cerevisiae* через 72 ч позволила получить сидры с меньшим содержанием спирта (на 2–21 % в зависимости от рода дрожжей). Время внесения дрожжей *S. cerevisiae* в бродающее сусло при смешанном брожении и последовательной инокуляции влияет как на интенсивность, так и на оттенок цвета готового сидра. На основании совокупности изученных показателей определены оптимальные сроки внесения *S. cerevisiae*: для *Lachancea thermotolerans* – не ранее 3-х суток (для реализации метаболического потенциала, который направлен на преобразование яблочной кислоты в молочную); для *Metschnikowia pulcherrima* – через 24 ч; для *Torulaspora delbrueckii* – через 48 ч.

## Критерии авторства

А. А. Ширшова – написание и редактирование статьи, подготовка статьи к публикации. А. А. Храпов, Н. М. Агеева – разработка концепции и дизайна исследования, анализ и интерпретация литературных данных. Е. А. Аль-Накиб, Е. В. Глоба, И. В. Сердюков, А. Р. Изофатов – проведение аналитических испытаний, сбор и анализ экспериментальных данных. И. В. Сердюков, А. Р. Изофатов – обработка рисунков и таблиц.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## Contribution

A.A. Shirshova wrote and proofread the article. A.A. Khrapov and N.M. Ageyeva developed the concept, designed the research, and wrote the review. E.A. Al-Nakib, E.V. Globa, I.V. Serdyukov, and A.R. Izofatov conducted the analytical tests and analyzed the experimental data. I.V. Serdyukov and A.R. Izofatov illustrated the obtained results.

## Conflict of interest

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

## Список литературы / References

1. Kovács M, Pomázi A, Taczman-Brückner A, Kiskó G, Dobó V, *et al.* Detection and identification of food-borne yeasts: An overview of the relevant methods and their evolution. *Microorganisms*. 2025;13:981. <https://doi.org/10.3390/microorganisms13050981>
2. Агеева Н. М., Ширшова А. А., Ульяновская Е. В., Щеглов С. Н., Храпов А. А. и др. Сравнительный анализ биогенных аминов в винах и сидрах. *Техника и технология пищевых производств*. 2025. Т. 55. № 2. С. 284–299. [Ageyeva NM, Shirshova AA, Ulyanovskaya EV, Shcheglov SN, Khrapov AA, *et al.* Comparative analysis of biogenic amines in wines and ciders. *Food Processing: Techniques and Technology*. 2025;55(2):284–299. (In Russ.)] <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2025-2-2569>

3. Han Y, Du J. A comparative study of the effect of bacteria and yeasts communities on inoculated and spontaneously fermented apple cider. Food Microbiology. 2023;111:104195. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2022.104195>
4. Wang N, Zhu Y, Zhu R, Xiao Y, Qiu J, et al. Revealing the co-fermentation of *Saccharomyces cerevisiae* and *Schizosaccharomyces pombe* on the quality of cider based on the metabolomic and transcriptomic analysis. LWT. 2022;168:113943. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.113943>
5. Chen Y, Lei X, Sun L, Gao B, An P, et al. Exploring the potentials of indigenous *Saccharomyces cerevisiae* and *Pichia kudriavzevii* for enhancing flavour and aromatic characteristics in apricot wines. Food Chemistry: X. 2025;25:102178. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2025.102178>
6. Пермякова Л. В., Рябоконева Л. А., Сергеева И. Ю., Лашицкий С. С., Ли Я. и др. Продукты углекислотной экстракции как биоактиваторы дрожжей *Saccharomyces cerevisiae*. Техника и технология пищевых производств. 2025. Т. 55. № 3. С. 607–623. [Permyakova LV, Ryabokoneva LA, Sergeeva IYu, Lashitskiy SS, Li Y, et al. Carbon dioxide extraction products as biostimulators for yeast *Saccharomyces cerevisiae*. Food Processing: Techniques and Technology. 2025;55(3): 607–623. (In Russ.)] <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2025-3-2592>
7. Li W, Zhao Y, Liu C, Li S, Yue T, et al. Effects of secondary fermentation of four in-bottle *Saccharomyces cerevisiae* strains on sparkling cider sensory quality. Food Bioscience. 2022;48:101731. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2022.101731>
8. Sonets IV, Solovyev MA, Ivanova VA, Vasiluev PA, Kachalkin AV, et al. Hi-C metagenomics facilitate comparative genome analysis of bacteria and yeast from spontaneous beer and cider. Food Microbiology. 2024;121:104520. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2024.104520>
9. Zhou J, Wang X, Cao Y, Cheng Y, Li W, et al. Diversity and dynamics of microbial communities during spontaneous fermentation of different cultivars of apples from China and their relationship with the volatile components in the cider. Food Research International. 2025;206:116029. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2025.116029>
10. Yuan X, Wang T, Sun L, Qiao Z, Pan H, et al. Recent advances of fermented fruits: A review on strains, fermentation strategies, and functional activities. Food Chemistry: X. 2024;22:101482. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2024.101482>
11. Hou C-Y, Huang P-H, Lai Y-T, Lin S-P, Liou B-K, et al. Screening and identification of yeasts from fruits and their coculture for cider production. Fermentation. 2022;8(1):1. <https://doi.org/10.3390/fermentation8010001>
12. Серба Е. М., Юраскина Т. В., Римарева Л. В., Таджибова П. Ю., Соколова Е. Н. и др. Микробная биомасса – биоресурс для получения функциональных пищевых ингредиентов (обзор). Техника и технология пищевых производств. 2023. Т. 53. № 3. С. 426–444. [Serba EM, Yuraskina TV, Rimareva LV, Tadzibova PYu, Sokolova EN, et al. Microbial biomass as a bioresource of functional food ingredients: A review. Food Processing: Techniques and Technology. 2023;53(3):426–444. (In Russ.)] <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2023-3-2446>
13. Liu L, Gong T, Hu CY, Deng H, Meng YH. ZNF1 up-regulation improves aroma profile by activating carbohydrate metabolism-associated pathways in *Saccharomyces cerevisiae* WFC-SC-071. Food Bioscience. 2023;56:103337. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2023.103337>
14. Zhang Y, Zhang L, Fan W, Wang F, Shen Y, et al. Machine learning-assisted unveiling of aroma modulation by inorganic nitrogen during cider fermentation by *Pichia kluyveri*. Food Research International. 2026;227:118255. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2025.118255>
15. Lei X, Chen Y, Gao B, Zhang T, Dang G, et al. Fermentative performance of indigenous *Lachancea thermotolerans* in high-sugar and low-acid wine production: Insights from volatomics and metabolomics. Food Research International. 2025;211:116411. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2025.116411>
16. Fejzullahu F. Controlled fermentation strategies to enhance the aroma profile of fruit spirits. PhD diss. Magyar: Agrár- és Élettudományi Egyetem. 2024. <https://doi.org/10.54598/005180>
17. Renault P, Coulon J, Revel G, Barbe J-Ch, Bely M. Increase of fruity aroma during mixed *T. delbrueckii*/*S. cerevisiae* wine fermentation is linked to specific esters enhancement. International Journal of Food Microbiology. 2015;207:40–48. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2015.04.037>
18. Zeng C, Mu Y, Yuan J, Zhang H, Song J, et al. Effects of *Torulaspora delbrueckii* and *Saccharomyces cerevisiae* co-fermentation on the physicochemical and flavor compounds of Huanian apple cider. Molecules. 2024;29(8):1750. <https://doi.org/10.3390/molecules29081750>
19. Wu Y, Li Y, Liang H, Zhang S, Lin X, et al. Enhancing cider quality through co-fermentation with acid protease and esterase-producing *Metschnikowia* species and *Saccharomyces cerevisiae*. Journal of the Science of Food and Agriculture. 2024;105(2):1003–1011. <https://doi.org/10.1002/jsfa.13891>
20. Hranilovic A, Gambetta JM, Jeffery DW, Grbin PR, Jiranek V. Lower-alcohol wines produced by *Metschnikowia pulcherrima* and *Saccharomyces cerevisiae* co-fermentations: The effect of sequential inoculation timing. International Journal of Food Microbiology. 2020;329:108651. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2020.108651>
21. Moran D, Fleming M, Daly E, Gaughan N, Zabetakis I, et al. Anti-Platelet properties of apple must/skin yeasts and of their fermented apple cider products. Beverages. 2021;7(3):54. <https://doi.org/10.3390/beverages7030054>
22. Агеева Н. М., Ширшова А. А., Храпов А. А., Ульяновская Е. В., Чернуцкая Е. А. и др. Ароматобразующие компоненты сидров, произведенных из различных сортов яблони. Хранение и переработка сельхозсырья. 2024. Т. 32.

№ 2. С. 67–78. [Ageyeva NM, Shirshova AA, Khrapov AA, Ulyanovskaya EV, Chernutskaya EA, *et al.* Aroma-forming components of ciders produced from different apple varieties. Storage and Processing of Farm Products. 2024;32(2):67–78. (In Russ.)] <https://doi.org/10.36107/spfp.2024.2.514>

**Дополнительная информация об авторах / Additional information about the authors**

Ширшова Анастасия Александровна / Anastasia A. Shirshova ORCID 0000-0003-1428-5935; eLIBRARY SPIN 6175-5869

Храпов Антон Александрович / Anton A. Khrapov ORCID 0000-0001-6436-1970; eLIBRARY SPIN 6182-5762

Агеева Наталья Михайловна / Natalia M. Ageyeva ORCID 0000-0002-9165-6763; eLIBRARY SPIN 3807-3865

Аль-Накиб Екатерина Аделевна / Ekaterina A. Al-Nakib ORCID 0000-0003-0855-1176; eLIBRARY SPIN 7630-6098

Глоба Екатерина Владимировна / Ekaterina V. Globa ORCID 0000-0002-6890-3076; eLIBRARY SPIN 8576-4008

Сердюков Игорь Валерьевич / Igor V. Serdyukov ORCID 0009-0002-8956-2431

Изофатов Андрей Романович / Andrey R. Izofatov ORCID 0009-0003-3966-1834



<https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-3-2649>  
<https://elibrary.ru/ZYBGME>

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

## Hydrolysis of Dairy and Meat Substrates by Chicken vs. Porcine Pepsin



Dmitry S. Myagkonosov\*<sup>ID</sup>, Dmitry V. Abramov<sup>ID</sup>,  
Olga G. Kashnikova<sup>ID</sup>

All-Russian Scientific Research Institute of Butter and Cheese Making<sup>ROR</sup>, Uglich, Russia

Received: 16.04.2026

Revised: 10.05.2026

Accepted: 07.07.2026

\*e-mail: [d.myagkonosov@fncps.ru](mailto:d.myagkonosov@fncps.ru)

© D.S. Myagkonosov, D.V. Abramov, O.G. Kashnikova, 2026



### Abstract.

Commercial hydrolysis requires maximizing product yields while minimizing operational costs. This article describes the optimal parameters for pepsin-catalyzed hydrolysis (enzyme origin, temperature, and pH) to achieve the highest efficiency using biologically valuable whey, casein, and meat protein substrates.

WPC-80 whey protein concentrate (79.05% protein), sodium caseinate (93.70% protein), and dry bovine heart powder (76.0% protein) served as substrates. The hydrolysis involved porcine and chicken pepsin preparations at temperatures ranging from 35 to 50°C and a pH range of 2.0–4.0. The degree of hydrolysis was spectrophotometrically assessed based on the content of TCA-soluble products. The statistical analysis relied on a two-way analysis of variance (ANOVA).

Within the pH range of 2.0–4.0, the highest yield of casein and meat protein hydrolysates occurred at pH 2.0. For the whey protein substrate, the peak yields were observed at pH 2.9 using chicken pepsin and at pH 2.3 using porcine pepsin. Increasing the temperature from 35 to 50°C consistently enhanced the yield of hydrolysis products. Although pH 2.0 corresponded to the highest initial enzyme activity, the hydrolysis of dairy proteins was less effective due to the compact native structure of whey proteins and the formation of casein aggregates at this pH.

Pepsins proved to be highly effective for hydrolyzing meat proteins as substrate accessibility increased significantly at pH 2.0. Consequently, these enzymes can be recommended for the commercial hydrolysis of denatured and aggregated meat proteins subjected to intense thermal treatment.

**Keywords.** Chicken pepsin, porcine pepsin, whey proteins, caseins, meat proteins, hydrolysis

**Funding.** The research was part of State Assignment FGUS-2024-0007 to the Federal Scientific Center for Food Systems, Russian Academy of Sciences.

**For citation:** Myagkonosov DS, Abramov DV, Kashnikova OG. Hydrolysis of Dairy and Meat Substrates by Chicken vs. Porcine Pepsin. Food Processing: Techniques and Technology. 2026;56(3):450–464. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-3-2649>

## Сравнительная эффективность гидролиза куриным и свиным пепсином субстратов молочного и мясного происхождения



Д. С. Мягконов\*, Д. В. Абрамов, О. Г. Кашникова

Всероссийский научно-исследовательский институт маслоделия и сыроделия<sup>ROR</sup>, Углич, Россия

Поступила в редакцию: 16.04.2026

Принята после рецензирования: 10.05.2026

Принята к публикации: 07.07.2026

\*e-mail: [d.myagkonosov@fnscps.ru](mailto:d.myagkonosov@fnscps.ru)

© Д. С. Мягконов, Д. В. Абрамов, О. Г. Кашникова, 2026



### Аннотация.

С помощью пепсинов могут быть получены гидролизаты, содержащие биологически активные пептиды, которые обладают антиокислительной, антигипертензивной, антимикробной и антиканцерогенной активностью. Важным аспектом производства таких гидролизатов является повышение выхода продуктов из сырья и снижение себестоимости. Цель исследования – определить параметры гидролиза пепсином (происхождение фермента, температура и pH), позволяющие достигнуть максимального выхода продуктов гидролиза на высокоценных в биологическом плане субстратах из пищевых белков (белки молочной сыворотки, казеин, мясные белки).

В качестве субстратов применяли концентрат сывороточных белков КСБ-80 (79,05 % белка), казеинат натрия (93,70 % белка) и сухой мясной порошок из сердец крупного рогатого скота (76,0 % белка). Гидролиз проводили ферментными препаратами свиного и куриного пепсина при температуре 35–50 °C и pH 2–4 ед. в соответствии с центральным композиционным планом эксперимента. Степень гидролиза оценивали спектрофотометрическим методом по содержанию продуктов гидролиза, не осаждаемых трихлоруксусной кислотой. Статистическую обработку выполняли методом двухфакторного дисперсионного анализа.

Установлено, что в исследованном диапазоне pH от 2 до 4 ед. максимальный выход продуктов гидролиза на субстратах из казеина и мясного белка наблюдался при pH 2,0 ед., для субстрата на основе нативных сывороточных белков – при pH 2,9 ед. для куриного пепсина и при pH 2,3 ед. для свиного. Повышение температуры от 35 до 50 °C увеличивало выход продуктов гидролиза. Гидролиз молочных белков пепсином при pH 2,0 ед., соответствующем максимальной активности ферментов, затруднен из-за компактной структуры сывороточных белков и образования агрегатов казеина.

Пепсины наиболее эффективны для гидролиза мясных белков, поскольку при pH 2,0 ед. их доступность для гидролиза возрастает. Пепсины рекомендуются для гидролиза мясных белков, особенно подвергшихся интенсивной тепловой обработке, сильно денатурированных и агрегированных.

**Ключевые слова.** Куриный пепсин, свиной пепсин, сывороточные белки, казеины, мясные белки, гидролиз

**Финансирование.** Статья подготовлена в рамках выполнения исследований по государственному заданию № FGUS-2024-0007 Федерального научного центра пищевых систем им. В. М. Горбатова Российской академии наук.

**Для цитирования:** Мягконов Д. С., Абрамов Д. В., Кашникова О. Г. Сравнительная эффективность гидролиза куриным и свиным пепсином субстратов молочного и мясного происхождения. Техника и технология пищевых производств. 2026. Т. 56. № 3. С. 450–464. (На англ.) <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-3-2649>

### Introduction

Pepsin (Enzym commission EC 3.4.23.1) is an acidic protease with the highest activity in the pH range of 2.0–4.0. It remains active up to 60°C [1]. This protein is rich in acidic amino acid residues (43 out of 327), resulting in a very low isoelectric point (~ pH 1.0), above which it acquires a net positive charge. Its catalytic center consists of two aspartic acid residues: Asp32 and Asp215. Pepsin activity depends on the protonation state of these residues, which, in turn, depends on the pH. The catalytic activity requires one aspartic residue

to be protonated and the other to be deprotonated. This condition corresponds with the pH range of 1.0–5.0. At pH 5.0–7.0, pepsin activity drops due to insufficient ionization of the active center. At pH ≥ 7.0, pepsin undergoes denaturation [2, 3].

The pH level also affects the electrostatic interaction forces between the pepsin and the protein substrate. In a strongly acidic environment, where pH approximates 1.5–2.5, pepsin carries a net negative charge, whereas food proteins typically carry a net positive charge. These opposite charges lead to electrostatic attraction

between the enzyme and the substrate, thereby boosting hydrolysis [4].

The pH profile of pepsin activity varies depending on the substrate type and its three-dimensional structure. Studies using serum albumin as a substrate show that the activity of human pepsin, like that of porcine pepsin, peaks at pH 2.0 and falls down to a negligible level at pH  $\geq 5.0$  [5]. In an experiment with native hemoglobin, porcine pepsin activity was reported to peak at a pH of approximately 2.0 and declined as the pH rose to 4.0 [3]. A similar pattern for porcine pepsin was observed with denatured hemoglobin, whereas chicken pepsin exhibited peak activity at pH 2.5–3.0. During the hydrolysis of plant-derived (wheat, peas) proteins, the highest activity for both porcine and chicken pepsin occurred at pH 1.5 [6]. Pepsin activity against native egg albumin and bovine serum albumin peaked at pH  $\sim 2.0$ , shifting to higher pH values (3.0 and 4.0, respectively) when these proteins were in a denatured state. The optimal pH for pepsin activity against urea-denatured hemoglobin shifted from 2.0 to  $\sim 3.5$ , with activity maintained up to pH 5.0 [5].

Pepsin cleaves peptide bonds between specific amino acid residues. Since its active site contains hydrophobic regions, it preferentially cleaves bonds formed by hydrophobic amino acids, including phenylalanine, tyrosine, tryptophan, leucine, methionine, and isoleucine [3, 7]. This specificity is pH-dependent. In the hydrolysis of myofibrillar proteins, the highest specificity was recorded at pH  $\sim 1.3$ , where the enzyme cleaves only those bonds that involve phenylalanine and leucine. At pH  $\geq 2.0$ , the number of cleavable bond variants increases [3].

Pepsin is used in collagen production [8] and leather processing [9]. The pharmaceutical industry produces a pepsin preparation, which is prescribed as an auxiliary digestive agent [10]. The food industry uses pepsin in cheese production [11], while enzymatic modifications with pepsin are employed to tenderize meat and produce ready-to-eat foods, particularly meat sauces [12]. Pepsin is also utilized to produce enzymatic hydrolysates of animal and plant-derived food proteins with varying degrees of hydrolysis and functional activity [13–15].

Peptic hydrolysis of proteins is an essential stage in the digestion of food. Peptic protein hydrolysates serve as protein supplements for senior population, who secrete less pepsin with age [16]. Hydrolysis recovers food-grade protein from meat and fish industry waste [17, 18]. This approach enables the production of additional protein products from low-cost raw materials while reducing the volume of environmentally polluting waste. To separate meat proteins from non-hydrolyzable raw material components (bones, keratin impurities, etc.), the material undergoes preliminary processing using various techniques, including heating, high-pressure treatment, exposure to electric fields, or various combined treatments. The resulting meat substrates (suspensions, broths, or pastes) are free from ballast substances [11–20].

However, extensive denaturation and aggregation of meat proteins hinder subsequent hydrolysis [21]. Despite a lower hydrolysis rate, pepsin effectively hydrolyzes meat raw materials composed of aggregated proteins [22]. In addition, pepsin-derived products contain bioactive peptides that are beneficial for human physiology [23–25].

Pepsin owes its ability to generate bioactive peptides to its selectivity. This enzyme specifically targets the cleavage of bonds involving hydrophobic amino acids. Consequently, the peptides released during peptic hydrolysis feature hydrophobic amino acids at their termini [7]. Such peptides exhibit greater biological activity compared to peptides lacking hydrophobic terminal groups [23]. Peptic hydrolysates demonstrate the following activity types, depending on the type of protein substrate and the hydrolysis conditions:

- antioxidant activity (they protect body cells against damage by neutralizing peroxides and free radicals [26, 27]);
- they inhibit angiotensin-converting enzyme and dipeptidyl peptidase IV, thus reducing blood pressure and facilitating the treatment of type 2 diabetes [28];
- antihypertensive properties (they lower blood pressure [29]);
- antimicrobial activity (they inhibit the viability of pathogenic microorganisms [30]);
- anticarcinogenic activity (some peptides induce cancer cell death [31]).

Pepsin can also yield products with synergetic biological and functional properties, e.g., low antigenicity [32], reduced allergenicity, antioxidant, anticarcinogenic, and immunomodulatory effects, etc. [33].

The economic aspect of hydrolysate production is as important as the production of hydrolysates with targeted functional properties. Optimal pepsin hydrolysis conditions reduce processing time and increase the hydrolysate yield while reducing the raw material, labor, and energy costs. This study explores the pepsin hydrolysis parameters (enzyme source, temperature, and pH) that maximize the yield of hydrolysis products from biologically valuable food protein substrates (whey proteins, casein, and meat proteins).

### Study objects and methods

Native whey protein concentrate (WPC-80) served as the source of whey proteins. It was obtained via ultrafiltration and contained 79.05% protein (Molochny Mir, Belarus).

Sodium caseinate with a protein content of 93.70% was prepared by skimming raw cow's milk (Agrivolga, Russia) in a cream separator to obtain a fat content of 0.05%. The milk was placed in a jacketed vessel equipped with an agitator, cooled down to  $8 \pm 2^\circ\text{C}$ , and stirred while adding a 10% hydrochloric acid solution until the pH reached  $4.5 \pm 0.1$ . The acidified mix was heated to  $50 \pm 1^\circ\text{C}$  while stirring and allowed to settle to separate the casein precipitate. After that, we washed the precipitate to remove acid, lactose, and soluble minerals,

removed the supernatant by siphoning, and added deionized water to the precipitate ( $15 \pm 5^\circ\text{C}$ ) in a volume equal to half the initial volume of skim milk.

The acidity of the mix was adjusted to  $\text{pH } 4.7 \pm 0.1$  by adding a 10% hydrochloric acid solution, after which the precipitate settled for 16–18 h. The process included seven washing cycles. After the final cycle, the mix went through polyester fabric, and the casein precipitate was placed in a cheese mold for 2 h to drain moisture.

The drained casein precipitate was transferred to a vessel equipped with a stirrer, and deionized water was added in an amount equal to half the initial volume of the skimmed milk. To dissolve casein, the pH of the solution was adjusted to  $6.6 \pm 0.1$  by adding a 20% (w/w) NaOH solution under continuous stirring.

The neutralized mix was dried in a Niro-Atomizer spray dryer (Niro A/S, Denmark) with air temperatures of  $150 \pm 2^\circ\text{C}$  at the inlet and  $80 \pm 2^\circ\text{C}$  at the outlet of the drying chamber.

Dry meat powder with a protein mass fraction of 76.0% was produced from chilled bovine hearts with a protein mass fraction of 17.15% (Agrivolga, Russia). After grinding the raw material in a meat grinder, we sterilized the mince in an HC-O002 autoclave (Guangzhou Happycare Electronics, China) at  $121 \pm 1^\circ\text{C}$  for 20 min. After cooling, it was dispersed using a Biolo-Mix A8800 blender (BioloMix Trading, China). The dispersed mince was dried in a forced-air drying oven at  $55^\circ\text{C}$  for 4 h on silicone trays, ground in a coffee grinder, and sieved through a 24-mesh screen to remove particles that exceeded 0.7 mm.

The pepsin enzyme preparations included porcine pepsin with a proteolytic activity of 5,734 proteolytic units/g (SHAKO, Russia) and chicken pepsin with a proteolytic activity of 5,423 proteolytic units/g (Endocrine Enzyme Plant, Russia).

The protein mass fraction was determined in milk proteins and milk protein hydrolysates according to State Standard GOST 23327-98. For meat proteins and meat protein hydrolysates, the protocol followed State Standard GOST 25011-2017.

The protein mass fraction was calculated by multiplying the nitrogen mass fraction by a conversion factor of 6.38 (for whey proteins and casein) or 6.25 (for meat proteins). The total proteolytic activity (in proteolytic units/g) was determined using the Anson method with a hemoglobin substrate, modified as in GOST 34430-2018 for acidic proteases ( $\text{pH } 3.0$ ,  $30^\circ\text{C}$ ).

We prepared the protein substrate solutions by mixing a weighed amount of protein raw material with water in the ratio required to obtain a solution with 2% protein mass fraction. The meat powder solution underwent additional homogenization in an ULTRA-TURRAX T 18 Digital disperser (IKA, Germany) at 15,000 rpm for 1.0–1.5 min.

To prepare protein substrate solutions with the targeted pH, we used buffer solutions based on citrate

buffer ( $\text{pH } 3.0$  and  $4.0$ ) or citric acid ( $\text{pH } 2.0$ ) at a concentration of  $0.2 \text{ mol/dm}^3$ , following the method developed by V. S. Stoll *et al.* [34]. The substrate solutions with a protein mass fraction of 1% in a  $0.1 \text{ mol/dm}^3$  buffer were prepared by mixing a substrate solution with a protein mass fraction of 2% and a  $0.2 \text{ mol/dm}^3$  buffer solution in a 1:1 ratio. For better protein hydration, the resulting substrate solutions remained in a refrigerator at  $4^\circ\text{C}$  for 16–18 h.

After placing a  $43 \text{ cm}^3$  volume of the substrate solutions into  $50 \text{ cm}^3$  Falcon-type plastic tubes, we brought them to the hydrolysis temperature in a water bath. The hydrolysis was performed using an MTH-100 thermoshaker (Hangzhou Miu Instruments, China) at a shaking speed of 300 rpm (3 mm orbital diameter).

To initiate hydrolysis, we added  $0.8 \text{ cm}^3$  of enzyme solution to the tubes containing  $40 \text{ cm}^3$  of substrate upon removing  $3 \text{ cm}^3$  for a blank measurement. The enzyme concentration was adjusted to achieve an enzyme-to-substrate ratio of 40 proteolytic units/g of protein. The enzyme entered each successive tube at intervals of  $30 \pm 2 \text{ s}$ . The hydrolysis lasted 15 min for the casein-based substrate and 90 min for the substrates based on whey or meat proteins. The samples left the test tubes in the same sequence at intervals of  $30 \pm 2 \text{ s}$ .

The enzyme dose and hydrolysis time were determined preliminarily to yield a hydrolysis product concentration with absorbance values within the 0.1–1.0 range as determined by spectrophotometry.

The content of hydrolysis products was studied spectrophotometrically as in [3], with modified sample dilution and filtration.

Once the hydrolysis temperature was reached in the shaker tubes, a  $3.0 \text{ cm}^3$  aliquot of substrate was withdrawn from each tube to determine the blank level. These samples were transferred to  $50 \text{ cm}^3$  plastic Falcon-type centrifuge tubes with  $9 \text{ cm}^3$  of trichloroacetic acid (TCA) solution. The TCA concentration was 6.7% for the casein and the meat protein substrates (final TCA concentration = 5%) and 16.1% for the whey protein substrates (final TCA concentration = 12%).

The resulting mix was vortexed in a VX-MT vortex mixer (Xiamen Branch Tongxin Biomedical Technology, China) and incubated for 14–16 h in a refrigerator at  $4\text{--}5^\circ\text{C}$  to aggregate the non-hydrolyzed protein. Subsequently, the mix was centrifuged at 10,000 g for 10 min in a TsLn-16 centrifuge (Changsha Xiangzhi, China). The supernatant went through a nylon filter with  $0.45 \mu\text{m}$  pores (Tianjin Jinteng Experiment Equipment, China).

The hydrolysis products included peptides and free amino acids not precipitated in the TCA solution. Their content in the filtrate was determined by measuring the optical density at 280 nm and after subtracting the optical density at 320 nm. The measurements involved a PB 2201 spectrophotometer (Spectroscopy, Optics and Lasers Advanced Developments, Belarus) equipped with quartz cuvettes with a 10 mm optical path length. To compen-



sate for the effect of substrate background absorption, we subtracted the absorbance value of the blank from the obtained values.

The microscopy of the protein substrates involved “mounted drop” preparations and transmitted-light microscopy with a dark-field condenser. The images, made with a Canon EOS 600D digital camera, were processed with Digital Photo Professional v.4.5 (Canon, Japan). Before applying them onto the microscope slide, we preheated the substrate solutions to the hydrolysis temperature and allowed them to incubate at that temperature for 30 min.

The experiment followed a central composite design for response surface methodology [35]. The experimental design involved two quantitative factors, temperature (35, 40, 45, and 50°C) and pH (2.0, 3.0, and 4.0). One series of experiments featured chicken pepsin and the other used porcine pepsin. The experiments were carried out over two days, with two replicates performed each day ( $n = 4$ ).

The magnitude of the factors’ influence on the response variable was assessed using two-way analysis of variance (ANOVA) based on three statistical criteria: the ANOVA effect estimates, the Fisher’s  $F$ -ratio ( $F$ ), and the computed significance probability ( $p$ ) [35]. The factor effect represents the magnitude of the change in the response variable as the influencing factor shifts from its lower to its upper level. However, an assessment based on the factor effect is tied to the absolute value of the response variable, making it impossible to compare the strength of the factors’ influence on the response variable (hydrolysis product yield) across the different substrates and enzymes. Therefore, the  $F$ -test served as the evaluation criterion. This test reflects the impact of the factor’s variation on the variation of the response variable without depending on the absolute values of the response variable itself. The  $F$ -test provides comparable estimates of the strength of factor influence during the hydrolysis of different substrates by pepsins of various origins.

The Fisher’s  $F$ -test is designed to assess the statistical significance of the obtained result. However, under certain conditions, in particular when, within the chosen model, the factors have the same number of degrees of freedom and the residual error of the model is small (which is evidenced by a high value of the coefficient of determination  $R^2$ ), the value of the  $F$ -test will reflect not only statistical significance but also the strength of the factor’s influence on the response variable. A higher  $F$ -value for a factor will indicate a greater degree of influence of the variation of this factor on the variation of the dependent variable. The Fisher’s criterion is limited, as it yields an estimate that does not account for the change vector (i.e., whether it increases or decreases) in the response variable resulting from the variation of the influencing factor. To address this issue, we indicated the sign of the factor effect in the ANOVA table.

To confirm the statistical significance of the factor’s impact on the response variable, we also included the  $p$ -value in the table. A factor’s effect was statistically significant at  $p < 0.05$ . The statistical analysis relied on the Statistica software (StatSoft, USA).

## Results and discussion

The analysis of variance made it possible to evaluate the effect of the experimental factors on the response variable, i.e., hydrolysis yield. A model that incorporated linear and quadratic effects described the relationship between the response variable and the experimental factors, as well as the pairwise interaction effects between linear terms. Table 1 summarizes the data on the effect of each factor on the response variable.

The following regression relationships describe the dependence of the response variable (hydrolysis yield) on the factors (temperature and pH):

$$Y = a_1 \times \text{Temp} + a_2 \times \text{Temp}^2 + a_3 \times \text{pH} + a_4 \times \text{pH}^2 + a_5 \times \text{Temp} \times \text{pH} + b$$

where  $Y$  is the yield of hydrolysis products (optical density units); Temp denoted the temperature factor level (°C); pH was the pH factor level;  $a_i$  ( $i = 1 \dots 5$ ) denoted the coefficients for the equation factors;  $b$  stood for the equation constant.

We derived regression equations from the hydrolysis of protein substrates by chicken and porcine pepsins to calculate the temperature and pH values for the highest hydrolysis yield (Table 2), as well as the plots showing the effect of temperature and pH on the response variable (Fig. 1).

The model for the relationship between the response variable and the experimental factors incorporated linear and quadratic effects, as well as pairwise interaction effects. It exhibited a coefficient of determination in the range of  $0.95 < R^2 < 0.99$ ; that is, it accounted for 95–99% of variation in the response variable.

The linear temperature factor ( $\text{Temp}^L$ ) had a strong effect on hydrolysis yield across all the substrates. Based on the positive vector sign for this effect, raising the temperature from 35 to 50°C increased the yield of hydrolysis products. The  $F$ -test values for  $\text{Temp}^L$  showed that the chicken and the porcine pepsins responded differently to the changes in temperature and pH. When acting on the same substrate, a temperature change of 35–50°C had a greater impact on the hydrolysis yield for chicken pepsin than for porcine pepsin. Obviously, chicken pepsin was more temperature-sensitive, with its activity dropping together with the temperature. The porcine pepsin activity was less dependent on temperature fluctuations within the 35–50°C range.

The pH factor ( $\text{pH}^L$ ) had a strong linear effect on all substrate-pepsin combinations except for the hydrolysis of whey proteins by chicken pepsin. Based on the negative vector sign, increasing the pH from 2.0 to 4.0

resulted in a lower yield of peptic hydrolysis products. This result was in line with other studies: regardless of substrate, pepsin activity decreases as the pH rises within the 2.0–4.0 range [19]. The  $F$ -test values for  $\text{pH}^L$  indicated that the pH level had a greater effect on the activity of porcine pepsin than on that of chicken pepsin. The increase in active acidity from pH 2.0 to 4.0 corresponded to a greater loss in activity in porcine pepsin compared to chicken pepsin.

The analysis of variance indicated that the effect of factors on the response variable depended on the specific substrate-enzyme combination. This effect is

obvious from the differing estimates for the quadratic effects of temperature ( $\text{Temp}^Q$ ) and pH ( $\text{pH}^Q$ ), as well as from the pairwise interaction effect between the factors ( $\text{Temp}^L \times \text{pH}^L$ ).

The hydrolysis of the whey protein substrate demonstrated the following patterns. The whey protein hydrolysis yield had a linear dependence on the hydrolysis temperature, as the quadratic effect of the temperature factor ( $\text{Temp}^Q$ ) was statistically insignificant. For the pH factor, the quadratic effect ( $\text{pH}^Q$ ) was statistically significant and negative. Within the pH range of 2.0 to 4.0, the dependence of the response variable on the

Table 1. Effect of experimental factors on hydrolysis yield: Dispersion analysis

Таблица 1. Оценка влияния факторов эксперимента на выход продуктов гидролиза по результатам дисперсионного анализа

| Factor                                                  | Substrate     | Enzyme         |            |            |                |            |            |
|---------------------------------------------------------|---------------|----------------|------------|------------|----------------|------------|------------|
|                                                         |               | Chicken pepsin |            |            | Porcine pepsin |            |            |
|                                                         |               | Effect sign    | $F$ -ratio | $p$ -value | Effect sign    | $F$ -ratio | $p$ -value |
| Hydrolysis temperature <sup>L</sup> ( $\text{Temp}^L$ ) | Whey protein  | +              | 370.05     | ***        | +              | 262.79     | ***        |
|                                                         | Casein        | +              | 678.00     | ***        | +              | 333.01     | ***        |
|                                                         | Meat proteins | +              | 476.05     | ***        | +              | 210.54     | ***        |
| Hydrolysis temperature <sup>Q</sup> ( $\text{Temp}^Q$ ) | Whey protein  | +              | 3.50       | –          | +              | 2.92       | –          |
|                                                         | Casein        | –              | 30.18      | ***        | –              | 1.86       | –          |
|                                                         | Meat proteins | +              | 4.54       | *          | +              | 0.55       | –          |
| $\text{pH}^L$                                           | Whey protein  | –              | 2.64       | –          | –              | 573.18     | ***        |
|                                                         | Casein        | –              | 695.70     | ***        | –              | 1,580.47   | ***        |
|                                                         | Meat proteins | –              | 1,362.07   | ***        | –              | 2,621.21   | ***        |
| $\text{pH}^Q$                                           | Whey protein  | –              | 446.32     | ***        | –              | 185.24     | ***        |
|                                                         | Casein        | –              | 8.35       | **         | +              | 23.77      | ***        |
|                                                         | Meat proteins | +              | 34.72      | ***        | +              | 323.85     | ***        |
| $\text{Temp}^L \times \text{pH}^L$                      | Whey protein  | –              | 6.46       | *          | –              | 33.93      | ***        |
|                                                         | Casein        | +              | 20.63      | ***        | +              | 44.40      | ***        |
|                                                         | Meat proteins | –              | 77.49      | ***        | –              | 135.66     | ***        |
| $R^2$                                                   | Whey protein  | 0.95           |            |            | 0.96           |            |            |
|                                                         | Casein        | 0.97           |            |            | 0.98           |            |            |
|                                                         | Meat proteins | 0.98           |            |            | 0.99           |            |            |

Note: <sup>L</sup> – linear effect; <sup>Q</sup> – quadratic effect;  $R^2$  – multiple coefficient of determination; \*  $p < 0.05$ ; \*\*  $p < 0.01$ ; \*\*\*  $p < 0.001$ . Dash (–) indicates not statistically significant effect ( $p > 0.05$ ).

Примечание: <sup>L</sup> – оценка линейного эффекта фактора; <sup>Q</sup> – оценка квадратичного эффекта фактора;  $R^2$  – коэффициент детерминации аппроксимирующей модели; \* –  $p < 0,05$ ; \*\* –  $p < 0,01$ ; \*\*\* –  $p < 0,001$ . «–» – значение статистически недостоверно ( $p > 0,05$ ).

Table 2. Temperature and pH for the highest hydrolysis yield across the protein substrates

Таблица 2. Значения температуры и pH, соответствующие максимальному выходу продуктов гидролиза исследуемых белковых субстратов

| Factor          | Substrate     | Enzyme         |                |
|-----------------|---------------|----------------|----------------|
|                 |               | Chicken pepsin | Porcine pepsin |
| Temperature, °C | Whey protein  | 50.0           | 50.0           |
|                 | Casein        | 50.0           | 50.0           |
|                 | Meat proteins | 50.0           | 50.0           |
| pH              | Whey protein  | 2.9            | 2.3            |
|                 | Casein        | 2.0            | 2.0            |
|                 | Meat proteins | 2.0            | 2.0            |

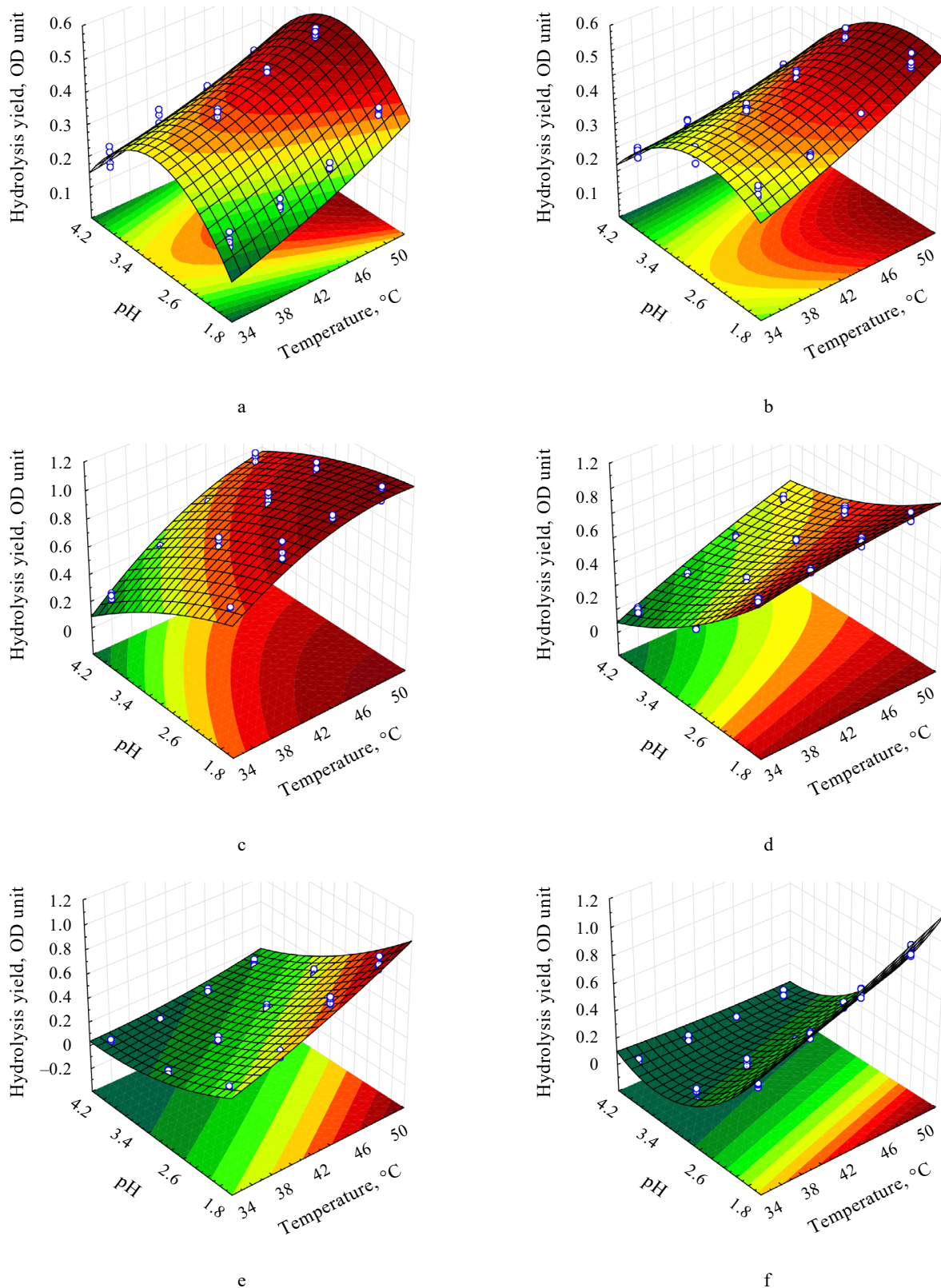


Figure 1. Effect of temperature and pH on yield surfaces: a – whey protein and chicken pepsin; b – whey protein and porcine pepsin; c – casein and chicken pepsin; d – casein and porcine pepsin; e – meat protein and chicken pepsin; and f – meat protein and porcine pepsin

Рисунок 1. Поверхности отклика выхода продуктов гидролиза в зависимости от температуры и pH при гидролизе белковых субстратов: а – сывороточный белок и куриный пепсин; б – сывороточный белок и свиной пепсин; в – казеин и куриный пепсин; д – казеин и свиной пепсин; е – мясной белок и куриный пепсин; ф – мясной белок и свиной пепсин

pH followed an inverted parabola shape that peaked at the vertex. As pH increased, the hydrolysis product yield initially rose and then fell, peaking at a specific pH value.

For chicken pepsin, the linear effect of the pH factor ( $\text{pH}^{\text{L}}$ ) was not significant ( $p > 0.05$ ) for the response variable. The values at the extremes of the factor's range (pH 2.0 and 4.0) demonstrated no statistical significance either. For porcine pepsin, both the linear ( $\text{pH}^{\text{L}}$ ) and quadratic ( $\text{pH}^{\text{Q}}$ ) effects of the pH factor significantly affected the response variable, with both effects being negative.

As with chicken pepsin, the dependence of the response variable on pH followed an inverted parabola shape, but the values at the range extremes differed: the response variable value was lower at the upper pH level (pH 4.0) than at the lower one (pH 2.0). A statistically significant pairwise interaction effect occurred between temperature and pH ( $\text{Temp}^{\text{L}} \times \text{pH}^{\text{L}}$ ). Although small in absolute magnitude, the effect was negative. Therefore, these factors had a mutually reinforcing effect, where the highest hydrolysis yield was achieved by higher temperatures at lower pH values.

Pepsin activity was earlier reported to peak at pH 2.0. As the pH rose from 2.0 to 4.0, the pepsin activity decreased. However, the pH level affected not only enzyme activity but also substrate accessibility for hydrolysis. It was the protein's spatial structure that served as the primary factor affecting the accessibility of whey proteins to enzymatic hydrolysis (by pepsin).  $\beta$ -Lactoglobulin became resistant to pepsin hydrolysis at low pH levels ( $\leq 3.0$ ), as strengthened intramolecular hydrogen bonds compacted the protein into a tight structure [36, 37]. Consequently, most potential pepsin cleavage sites with hydrophobic amino acids became sequestered within the hydrophobic core of the  $\beta$ -lactoglobulin molecule, making them largely inaccessible to the enzyme [36, 38].

The hydrolysis of  $\beta$ -lactoglobulin was reported to release peptides that exhibited a high propensity to aggregate via intermolecular  $\beta$ -sheets at pH 2.0. This aggregation tendency was typical of specific peptides, primarily those with hydrophobic regions, a low net charge (at pH 2.0), and no proline residues [39].

The susceptibility of  $\alpha$ -lactalbumin to pepsin hydrolysis is also known to depend on the protein's spatial structure. Unlike  $\beta$ -lactoglobulin, the tertiary structure of  $\alpha$ -lactalbumin does not become more compact when the pH drops below 3.0. Instead, it completely unfolds, exposing all its polypeptide bonds to the enzyme. When the pH rises to 4.0,  $\alpha$ -lactalbumin regains a compact three-dimensional structure that hinders enzyme access to potential hydrolysis sites [1].

According to A. Ye *et al.* [37],  $\alpha$ -lactalbumin and bovine serum albumin were hydrolyzed by pepsin significantly faster than  $\beta$ -lactoglobulin at the same pH level. As reported by K. L. Jakopović *et al.* [1],  $\beta$ -lactoglobulin underwent virtually no hydrolysis by pepsin at the pH

range of 2.5–3.5, whereas  $\alpha$ -lactalbumin actively participated in peptic hydrolysis. After 60 min of hydrolysis at 40–45°C, 95–100% of  $\beta$ -lactoglobulin remained unhydrolyzed, compared to  $\leq 20\%$  in  $\alpha$ -lactalbumin.

The susceptibility of whey proteins to enzymatic hydrolysis also depends on their degree of aggregation [40]. Since the production of whey protein concentrate involves a heat treatment step, i.e., pasteurization, a portion of the constituent proteins denatures and becomes able to form aggregates at  $\text{pH} < 4.0$  [41].

We used light microscopy to study the formation of whey protein aggregates in the substrates. Figure 2 shows micrographs of protein substrates based on whey proteins in buffer solutions at pH 2.0, 3.0, and 4.0.

Prior to hydrolysis, whey protein solutions contained aggregates whose size depended on the pH. At pH 2.0, whey proteins had a high positive charge, resulting in strong electrostatic repulsion between protein particles and preventing their association into aggregates [36]. As the pH rose from 2.0 to 4.0, the charge on the protein particles decreased, as did the electrostatic repulsion. Particle aggregation (turbidity) manifested at pH 3.0, while weak, loose protein aggregates formed in the solution at pH 4.0.

Following hydrolysis, larger and denser aggregates appeared in the whey protein solutions. The formation of post-hydrolysis aggregates was linked to the unfolding of the whey protein structure following limited hydrolysis. This process exposed hydrophobic regions and free thiol groups. The interaction between these groups drove the association of protein molecules into aggregates [42]. The size of hydrolyzed protein aggregates, like that of non-hydrolyzed protein aggregates, depended on the pH level. As the pH approached 4.0, the surface charge decreased, as did the associated electrostatic repulsion forces, promoting the formation of larger aggregates (Fig. 2). The aggregation of protein particles reduced the rate of hydrolysis because a significant proportion of the bonds susceptible to pepsin cleavage became buried within the protein aggregates. The hydrolysis rate decreased as the size and density of the aggregates increased [43].

The highest yield of whey protein hydrolysis at pH 2.0–3.0 occurred because two processes with opposing effects on hydrolysis happened simultaneously as the pH rose from 2.0 to 3.0. On one hand, the pepsin activity went down. On the other hand, the conformational changes increased the susceptibility of the major whey protein, i.e.,  $\beta$ -lactoglobulin, to hydrolysis. These opposing factors came to balance at pH 2.0–3.0. As pH grew from 3.0 to 4.0, the aggregation of protein particles intensified, including those destabilized by hydrolysis, and inhibited the enzymatic process. Superimposed on this is the difference in the pH-dependent activity between porcine and chicken pepsins, a phenomenon documented by I. Crévieu-Gabriel *et al.* [6]. Resulting from the synergetic effect of these factors, the activity



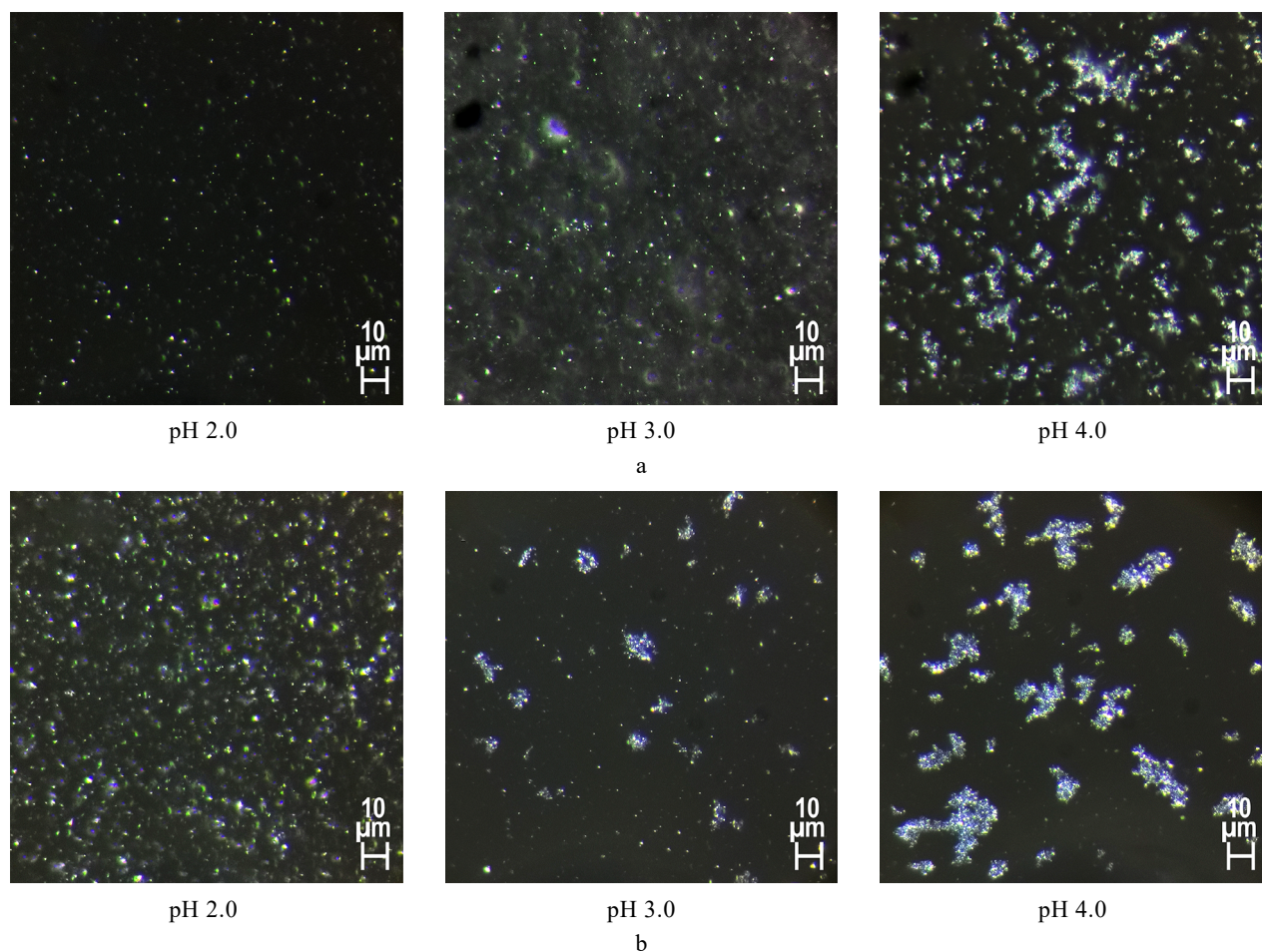


Figure 2. Protein substrates based on whey proteins before (a) and after (b) hydrolysis at 50°C

Рисунок 2. Микрофотографии белковых субстратов на основе сывороточных белков до (а) и после (б) гидролиза при температуре 50 °С

against whey proteins peaked at pH 2.9 for chicken pepsin and at pH 2.3 for the more acidophilic porcine pepsin.

We compared the curves showing the hydrolysis yield as a function of temperature and pH across different substrates. The plots for caseins and meat proteins were largely similar but differed significantly from those for whey proteins (Fig. 1). These differences were further corroborated by the  $F$ -values and the signs of factor effects derived from the analysis of variance (Table 1).

We also compared the  $F$ -values for the linear effects of temperature ( $\text{Temp}^L$ ) and pH ( $\text{pH}^L$ ). Varying the pH factor resulted in a greater change in the response variable (hydrolysis product yield) than varying the Temp factor. Thus, the hydrolysis yield depended more strongly on the pH level than on the hydrolysis temperature. Increasing the pH from 2.0 to 4.0 reduced the hydrolysis yield. Raising the temperature from 35 to 50°C increased the hydrolysis yield, as confirmed by the positive vector sign of the  $\text{Temp}^L$  effect. The linear effect values for temperature and pH significantly exceeded the quadratic effect values for these factors: the peptic hydrolysis of casein and meat proteins demonstrated an almost proportional

relationship between the hydrolysis product yield and the temperature and pH levels. The predominance of linear effects over quadratic effects for temperature and pH implied the absence of an extremum (maximum or minimum) for the response variable within the given temperature and pH ranges. Based on the signs of the linear effects (“+” for temperature and “–” for pH), the hydrolysis yield from casein and meat protein substrates increased, peaking when the temperature reached 50°C and the pH dropped down to 2.0.

Based on the statistically significant pairwise factor interaction effect, the impact of one factor on the variation of the response variable depended on the level of the other. Regarding the response variable (hydrolysis yield), the signs of the pairwise interaction effects between temperature and pH ( $\text{Temp}^L \times \text{pH}^L$ ) differed depending on the type of substrate (casein or meat proteins). For casein, the sign of the  $\text{Temp}^L \times \text{pH}^L$  interaction effect was positive, i.e., a higher temperature level resulted in a greater increase in hydrolysis at a higher pH level. For the meat protein substrate, the  $\text{Temp}^L \times \text{pH}^L$  interaction effect had a negative sign: a lower pH level

avored a greater increase in the hydrolysis yield in response to rising temperatures.

The absolute value of the  $F$ -statistic for the  $\text{Temp}^{\text{I}} \times \text{pH}^{\text{I}}$  interaction effect was substantially lower than that for the individual factors. Thus, the pairwise interaction does not have a noticeable effect on the degree of hydrolysis of casein and meat protein samples.

The magnitude and direction of the effects of temperature and pH on hydrolysis yield was similar for casein and meat protein substrates, unlike their effect on hydrolysis yield from whey proteins. This phenomenon could be attributed to structural differences across these substrates. Whey proteins were initially present in the substrate in their native form, with aggregation occurring as a result of hydrolysis. In contrast, proteins in casein and meat protein substrates were aggregated from the outset. Figure 3 shows micrographs of casein substrate preparations in buffer solutions at pH 2.0, 3.0, and 4.0.

Casein particles differ in size and shape in microscopic preparations. This variability could be attributed to the following factors. The pH of 4.6 is the isoelectric point of casein. It triggered the casein micelle aggregation, leading to gel formation. A further drop in pH below 4.0 intensified the forces that counteracted the aggregation. On one hand, the aggregation was promoted by hydrophobic interactions. These interactions were further enhanced by the rising temperatures [44], as well as by the aggregation activated by the hydrogen bonding, which resulted from the increased charge of amino acid side chains [36]. On the other hand, the increasing positive electrical charge of the casein molecules hindered the aggregation by generating electrostatic repulsive forces. The combined effect of these forces could lead to the development of dense casein gel. However, such external disruptive forces as vigorous stirring could read to a suspension of fine particles instead of cohesive gel. Upon further acidification to pH values below 3.5, the solubility of casein particles increased due to the rise in positive charge and stronger electrostatic repulsive forces. At pH around 2.0, the casein gel redissolved, developing a stable solution [45].

L. Salelles *et al.* [5] prepared casein aggregate solutions by slow acidification: casein aggregates with a loose structure and porous surface formed within the pH range of 3.0–5.0. The authors reported no statistically significant differences in the sizes of aggregates formed at pH 3.0–5.0 (133–203  $\mu\text{m}$ ). The pH between 1.0 and 2.0 saw the development of dense aggregates with smooth surfaces. On average, the size of aggregates formed at pH 2.0 was half that of aggregates formed at pH 3.0–5.0. In our experiment, we prepared the substrate by stirring an aqueous casein solution with an acidic buffer solution, which prevented gel formation. As a result, the suspensions consisted of aggregates of varying sizes (Fig. 3).

The structure of casein curd was reported to affect the rate of pepsin hydrolysis. Casein hydrolysis is known to proceed much more slowly in dense curds than in loose,

porous ones [46]. A dense casein curd structure was reported to inhibit the hydrolysis rate because the diffusion of pepsin into the curd was hindered, meaning only the surface proteins underwent hydrolysis [47]. According to G. Somaratne *et al.* [48], the pepsin diffusion rate was higher in a looser protein gel network than in a denser gel. X. He *et al.* [49] reported that loosening the casein curd through high-pressure treatment (400–600 MPa) increased the rate of pepsin hydrolysis.

The pairwise interaction effect between temperature and pH (ANOVA, Table 1) could be attributed to the varying density of casein aggregates at different pH levels. This effect manifested as a tendency for the hydrolysis yield to decrease as the temperature rose from 35 to 50°C and the pH dropped from 4.0 to 2.0. The pre-hydrolysis microscopic examination of casein solutions revealed that the aggregates formed at pH 4.0 possessed a less dense structure and more irregular edges compared to those formed at pH 3.0 (Fig. 3). Consequently, the less dense aggregates produced at pH 4.0 were more susceptible to hydrolysis than the denser ones formed at pH 3.0. The tendency for hydrolysis to slow down when the pH dropped down to 2.0 could be attributed to other factors.

Peptides released during casein hydrolysis were able to self-assemble into aggregates, primarily through hydrophobic interactions and hydrogen bonding. The cores of these aggregates consisted of hydrophobic peptides, while amphiphilic peptides attached to these cores via hydrophobic regions and surrounded them. At pH 2.0, the hydrophobic interactions, as well as the enhanced hydrogen bonding and cation– $\pi$  interactions, promoted the further association of hydrolyzed casein aggregates into an extensive three-dimensional network of macro-aggregates [47]. A similar branched network of aggregated protein particles was visible in the post-hydrolysis (pH 2.0) microscopic image of casein (Fig. 3).

The analysis of variance (Table 1), the dependence of hydrolysis yield on temperature and pH (Fig. 1), and the structure of protein particles in casein solutions (Fig. 3) made it possible to formulate a hypothesis to explain the slowdown in the casein hydrolysis yield as temperature rose at pH 2.0. The activity of chicken and porcine pepsins peaked under these conditions, while casein was virtually unaggregated and accessible for interaction with the enzymes (Fig. 3). As a result, rapid casein hydrolysis occurred, followed by the aggregation of released peptides. Some of the bonds susceptible to pepsin hydrolysis became buried within the aggregates and inaccessible to the enzyme, thus reducing the reaction rate and hydrolysis yield. This pattern was clear in the sample with chicken pepsin: as the pH dropped from 4.0 to 2.0, the increase in hydrolysis yield became progressively less pronounced (Fig. 1). For porcine pepsin, the sharp rise in activity at pH 2.0 accelerated the hydrolysis rate, compensating for the lower substrate accessibility and accelerating the yield (Fig. 1).



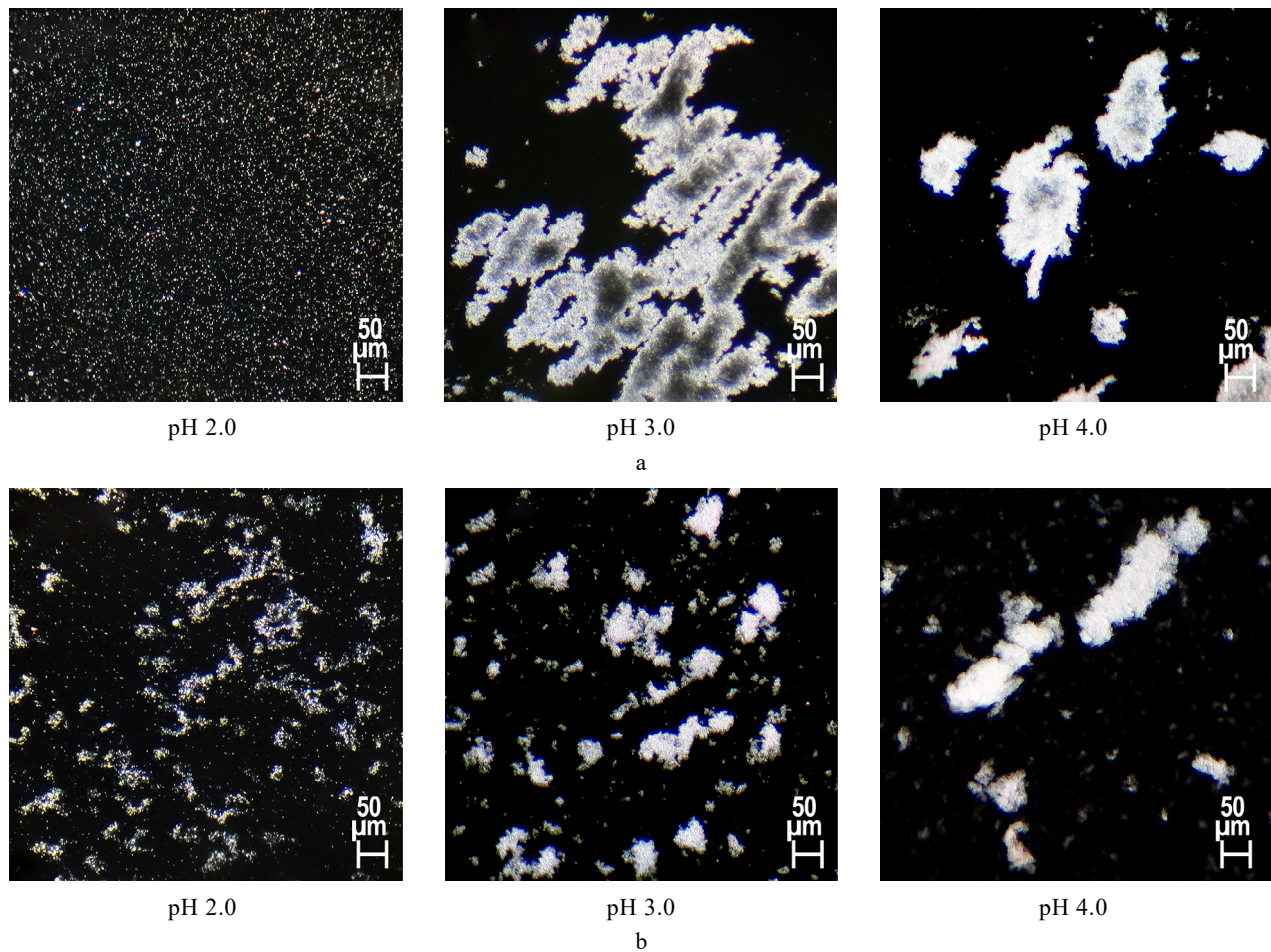


Figure 3. Protein substrates based on casein before (a) and after (b) hydrolysis at 50°C

Рисунок 3. Микрофотографии белковых субстратов на основе казеина до (a) и после (b) гидролиза при температуре 50 °C

Like the casein substrate, the meat protein substrate contained proteins in an aggregated form. Figure 4 shows micrographs of meat protein substrate preparations in buffer solutions at pH 2.0, 3.0, and 4.0.

These images were compared with electron microscopy images of collagen [48, 51, 52]. Based on the comparison, we were able to identify the large fibrous particles as collagen fibril fragments.

The meat protein substrate used in this experiment demonstrated a distinctive feature: a severe denaturation and aggregation of proteins. This feature was visible in the microscopic images, which revealed numerous insoluble particles. As with the casein substrate, the aggregation of meat proteins limited their accessibility to the enzyme, thereby reducing the hydrolysis rate.

The pre-hydrolysis pH of the substrate had no effect on protein particles and their accessibility to the enzyme. The hydrolytic activity of pepsin disrupted the structure of protein particles, enabling the enzyme to diffuse into the particles and further enhancing their hydrolysis [39]. At pH 4.0, we observed no hydrolysis-induced changes

in the structure of collagen particles. At pH 3.0–2.0, we detected hydration and structural breakdown of collagen fibrils. They disintegrated into smaller particles, which increased the substrate surface area available for contact with the enzyme. The extensive hydration improved the substrate solubility and further accelerated the hydrolysis. Similar changes occurred in other components of the meat protein substrate, including aggregates of myofibrillar and sarcoplasmic proteins. The sarcoplasmic proteins were so small that it was difficult to visualize any possible structural changes using light microscopy. However, the significant increase in the hydrolysis yield from the meat protein substrate as the pH dropped from 4.0 to 2.0 indicated their active cleavage by pepsin. The collagen hydrolysis products exhibited very low absorbance at 280 nm and could not contribute significantly to the hydrolysis yield, as measured by absorbance intensity at this wavelength. Therefore, the higher yield was attributed solely to the hydrolysis products from myofibrillar and sarcoplasmic proteins: they are rich in tyrosine and tryptophan, and their absorbance ability is high at 280 nm.

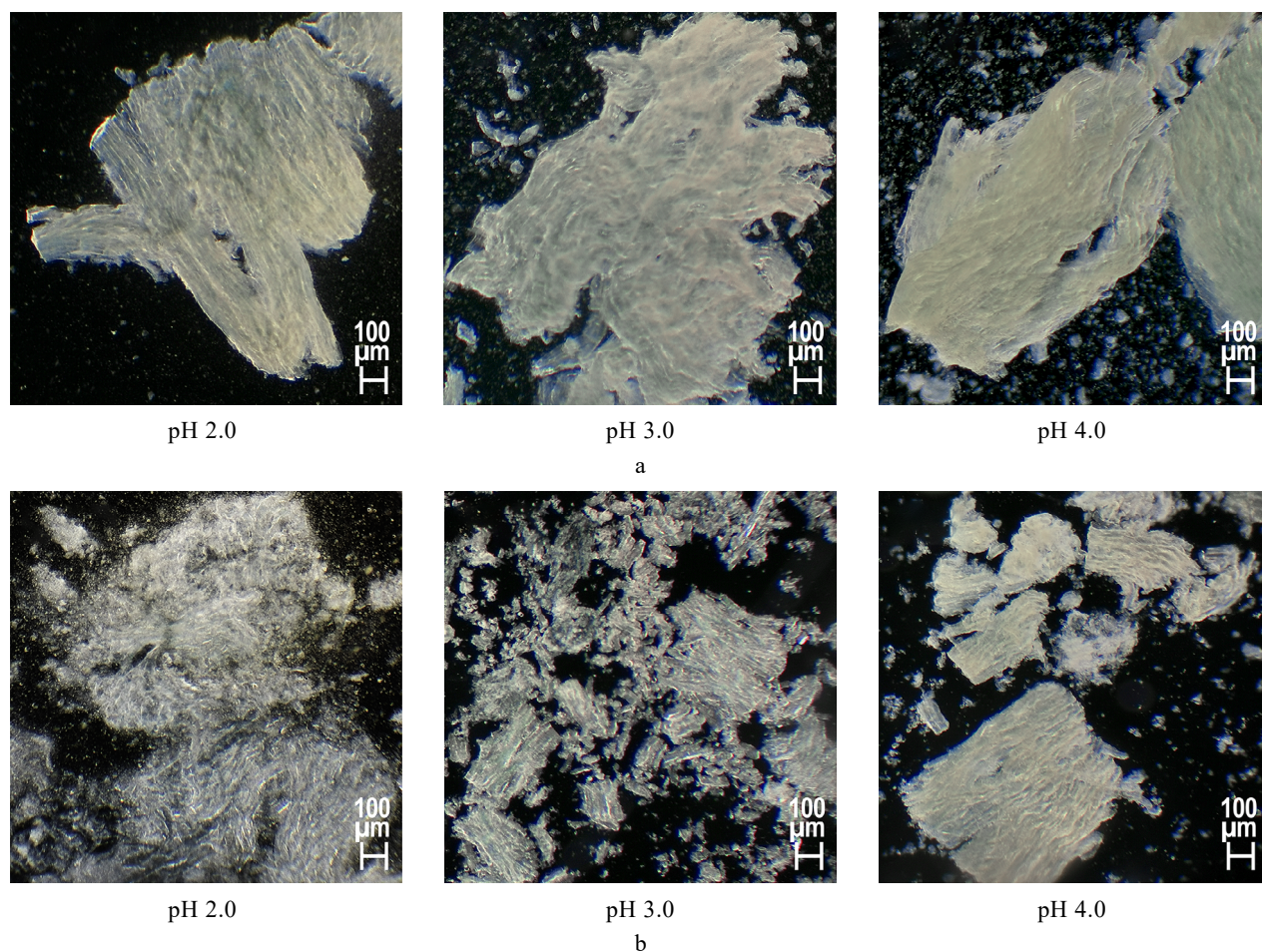


Figure 4. Protein substrates based on meat proteins before (a) and after (b) hydrolysis at 50°C

Рисунок 4. Микрофотографии белковых субстратов на основе мясных белков до (а) и после (б) гидролиза при температуре 50 °С

For casein, as the pH dropped to 2.0, the hydrolysis slowed down due to the formation of aggregates from the hydrolysis products and poor substrate accessibility. For meat proteins, the effect was the opposite: lowering the pH to 2.0 accelerated the hydrolysis due to the changes in the substrate structure and the exposure of numerous potential pepsin cleavage sites on the surface. This mechanism explains the negative vector sign of the  $\text{Temp}^L \times \text{pH}^L$  interaction (ANOVA) in the model describing the hydrolysis product yield from meat proteins as a function of temperature and pH. Consequently, the hydrolysis yield from the meat protein substrate increased as the temperature went up and the pH went down.

### Conclusions

For porcine and chicken pepsins, the highest hydrolysis yield had almost the same temperatures in the experiments with native whey proteins, caseins, and denatured meat proteins as substrates. Within the temperature range of 35–50°C, the highest yield occurred at 50°C. In fact, the temperature could have been higher, as pepsin is known to retain its activity up to 60°C. For a given pro-

tein substrate, chicken pepsin lost more activity than porcine pepsin as the temperature dropped from 50 to 35°C.

Within the pH range between 2.0 and 4.0, the highest yield from casein and meat protein substrates was observed at pH 2.0. In the experiment with native whey protein, it was at pH 2.9 for chicken pepsin and pH 2.3 for porcine pepsin. Porcine pepsin was more dependent on pH than chicken pepsin. Porcine pepsin activity dropped sharply as the pH rose from 2.0 to 3.0, even at the optimal hydrolysis temperature (50°C). The activity of chicken pepsin remained more stable under the same conditions.

Temperature and pH affected the hydrolysis rate not only by altering pepsin activity but also indirectly, by changing the substrate structure.

At pH 2.0, which was optimal for pepsin activity,  $\beta$ -lactoglobulin (a major whey protein) adopted a compact structure that hindered enzymatic hydrolysis. As the pH rose from 2.0 to 4.0, the susceptibility of  $\beta$ -lactoglobulin to hydrolysis increased, but the pepsin activity declined. A balance between these opposing processes was achieved within the pH range of 2.0–3.0,



where native whey protein substrates had the highest rate of peptic hydrolysis.

For caseins, lowering the pH from 4.0 to 3.0 accelerated the hydrolysis by increasing the pepsin activity and disrupting the casein aggregates. However, as the pH dropped down to 2.0, the hydrolysis slowed down due to the formation of secondary aggregates derived from casein hydrolysis products.

For meat proteins, lowering the pH from 4.0 to 2.0 accelerated the hydrolysis through the synergy of two mutually reinforcing processes: increased pepsin activity and greater substrate accessibility.

Based on these results, pepsins demonstrated strong potential for producing hydrolysates from meat proteins, particularly those highly denatured and aggregated after intensive heat treatment. In addition, the pepsin hydrolysis of meat substrates yielded products with high biological value and achieved effective protein bioconversion from the raw material.

### Contribution

D.S. Myagkonosov supervised the research, wrote the review, analyzed the experimental results, and wrote

the manuscript. D.V. Abramov performed the experiments, processed the results, and wrote the manuscript. O.G. Kashnikova conducted the experiments, wrote the manuscript, and analyzed the results.

### Conflict of interest

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

### Критерии авторства

Д. С. Мяконосов – организация и руководство проведением исследований, анализ литературы и результатов экспериментов, написание статьи. Д. В. Абрамов – проведение экспериментов, обработка результатов, написание статьи. О. Г. Кашникова – проведение экспериментов, участие в написании статьи и анализе результатов.

### Конфликт интересов

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

### References / Список литературы

1. Jakopović KL, Cheison SC, Kulozik U, Božanić R. Comparison of selective hydrolysis of  $\alpha$ -lactalbumin by acid Protease A and Protease M as alternative to pepsin: Potential for  $\beta$ -lactoglobulin purification in whey proteins. *Journal of Dairy Research*. 2019;86(1):114–119. <https://doi.org/10.1017/S0022029919000086>
2. Bayrak M, Han Qi, Greaves TL, Seibt S, Yu H, et al. Correlating structure and activity of pepsin enzyme in H<sub>2</sub>O and D<sub>2</sub>O for the study of gastric digestion. *Food Chemistry Advances*. 2024;4:100638. <https://doi.org/10.1016/j.foccha.2024.100638>
3. Kondjoyan A, Daudin JD, Santé-Lhoutellier V. Modelling of pepsin digestibility of myofibrillar proteins and of variations due to heating. *Food Chemistry*. 2015;172:265–271. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.08.110>
4. Maeda N, Dulko D, Macierzanka A, Jungnickel C. Analysis of the factors affecting static *in vitro* pepsinolysis of food proteins. *Molecules*. 2022;27(4):1260. <https://doi.org/10.3390/molecules27041260>
5. Salelles L, Floury J, Le Feunteun S. Pepsin activity as a function of pH and digestion time on caseins and egg white proteins under static *in vitro* conditions. *Food and Function*. 2021;12(24):12468–12478. <https://doi.org/10.1039/D1FO02453A>
6. Crévieu-Gabriel I, Gomez J, Caffin JP, Carré B. Comparison of pig and chicken pepsins for protein hydrolysis. *Reproduction Nutrition Development*. 1999;39(4):443–454. <https://doi.org/10.1051/rnd:19990404>
7. Suwareh O, Causeur D, Jardin J, Briard-Bion V, Le Feunteun S, et al. Statistical modeling of *in vitro* pepsin specificity. *Food Chemistry*. 2021;362:130098. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130098>
8. Matinong AME, Chisti Y, Pickering KL, Haverkamp RG. Collagen extraction from animal skin. *Biology*. 2022;11(6):905. <https://doi.org/10.3390/biology11060905>
9. Hasan MJ, Haque P, Rahman MM. Protease enzyme based cleaner leather processing: A review. *Journal of Cleaner Production*. 2022;365:132826. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132826>
10. Park HJ, Lee HJ. Digestive enzyme supplementation in prescription drugs, over-the-counter drugs, and enzyme foods. *Journal of Pharmaceutical Investigation*. 2023;53(3):343–355. <https://doi.org/10.1007/s40005-022-00605-8>
11. Osuna-Ruiz I, Tiznado-Garzón R, Salazar-Leyva JA, García-Magaña de ML, García IB, et al. Milk-clotting and proteolytic properties of a partially purified pepsin from Yellowfin Tuna (*Thunnus albacares*) and its potential for cheesemaking. *Food and Bioprocess Technology*. 2023;16(8):1769–1780. <https://doi.org/10.1007/s11947-023-03030-3>
12. Niamah AK, Al-Sahlany STG, Verma DK, Singh S, Tripathi S, et al. Enzymes for meat and meat processing industry: Current trends, technological development, and future prospects. *Enzymatic Processes for Food Valorization*. 2024;23–36. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-95996-4.00002-2>
13. Sokolov DV, Bolkhonov BA, Zhamsaranova SD, Lebedeva SN, Bazhenova BA. Enzymatic hydrolysis of soy protein. *Food Processing: Techniques and Technology*. 2023;53(1):86–96. (In Russ.). [Соколов Д. В., Болхонов Б. А., Жамсаранова С. Д., Лебедева С. Н., Баженова Б. А. Ферментативный гидролиз соевого белка. Техника и технология пищевых производств. 2023. Т. 53. № 1. С. 86–96.] <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2023-1-2418>

14. Lebedeva SN, Bolkhonov BA, Zhamsaranova SD, Bazhenova BA, Leskova SYu. Functional profile of enzymatic hydrolysates in food proteins. *Food Processing: Techniques and Technology*. 2024;54(2):412–422. (In Russ.). [Лебедева С. Н., Болхонов Б. А., Жамсаранова С. Д., Баженова Б. А., Лескова С. Ю. Изучение некоторых функциональных характеристик ферментативных гидролизатов пищевых белков. *Техника и технология пищевых производств*. 2024. Т. 54. № 2. С. 412–422.] <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-2-2515>
15. 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>
16. Wang C, Zhao F, Bai Y, Li C, Xu X, *et al.* Effect of gastrointestinal alterations mimicking elderly conditions on *in vitro* digestion of meat and soy proteins. *Food Chemistry*. 2022;383:132465. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.132465>
17. Kostyleva EV, Sereda AS, Velikoretskaya IA, Kurbatova EI, Tsurikova NV. Proteases for obtaining of food protein hydrolysates from proteinaceous by-products. *Problems of Nutrition*. 2023;92(1):116–32. (In Russ.). [Костылева Е. В., Середина А. С., Великоретская И. А., Курбатова Е. И., Цурикова Н. В. Использование протеолитических ферментов для получения белковых гидролизатов пищевого назначения из вторичного сырья. *Вопросы питания*. 2023. Т. 92. № 1. С. 116–132.] <https://doi.org/10.33029/0042-8833-2023-92-1-116-132>
18. Kuchina YuA, Kolotova DS, Tolstikov VV, Vasilevich VV, Derkach SR. Effect of enzyme type and concentration on fish protein hydrolysates from *Gadus morhua* processing waste. *Food Processing: Techniques and Technology*. 2026;56(1):1–15. (In Russ.). [Кучина Ю. А., Колотова Д. С., Толстиков В. В., Василевич В. В., Деркач С. Р. Ферментативные рыбные белковые гидролизаты из отходов переработки атлантической трески: влияние типа и концентрации фермента. *Техника и технология пищевых производств*. 2026. Т. 56. № 1. С. 1–15.] <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-1-2618>
19. Qi L, Qin X, Mao L, Zhang C, Guo Y. Steam explosion assisted enzymolysis for the preparation of low molecular weight osteogenic collagen peptides from bovine bone by-products. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 2025;104221. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2025.104221>
20. Dao DT, Hien LT, Thinh NP, Thang N, Ha DV, *et al.* Recovery of amino acids and peptides from pig bone soup using thermal pre-treatment and enzymatic hydrolysis. *Journal of Food Processing and Preservation*. 2022;46(7):e16700. <https://doi.org/10.1111/jfpp.16700>
21. Chen H, Zhao G, Yu X, Zhang Q, Zhu C, *et al.* Exploring *in vitro* gastrointestinal digestion of myofibrillar proteins at different heating temperatures. *Food Chemistry*. 2023;414:135694. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.135694>
22. Yang M, Yang Z, Everett DW, Gilbert EP, Singh H, *et al.* Digestion of food proteins: The role of pepsin. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2025;65:6919–6940. <https://doi.org/10.1080/10408398.2025.2453096>
23. Castañeda-Valbuena D, Berenguer-Murcia Á, Fernandez-Lafuente R, Morellon-Sterling R, Tacias-Pascacio VG. Biological activities of peptides obtained by pepsin hydrolysis of fishery products. *Process Biochemistry*. 2022;120:53–63. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2022.05.029>
24. Ashaolu TJ, Lee CC, Ashaolu JO, Tarhan O, Pourjafar H, *et al.* Pepsin: An excellent proteolytic enzyme for the production of bioactive peptides. *Food Reviews International*. 2024;40(7):1875–1912. <https://doi.org/10.1080/87559129.2023.2238814>
25. Sosalagere C, Kehinde BA, Sharma P. Isolation and functionalities of bioactive peptides from fruits and vegetables: A reviews. *Food chemistry*. 2022;366:130494. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130494>
26. Kumari S, Shahidi F. Bioactive peptides as antioxidants and antimicrobials: Fundamentals and applications. *Journal of Food Bioactives*. 2024;25. <https://doi.org/10.31665/JFB.2024.18367>
27. Wang YM, Li X-Y, Wang J, He Y, Chi C-F, *et al.* Antioxidant peptides from protein hydrolysate of skipjack tuna milt: Purification, identification, and cytoprotection on H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> damaged human umbilical vein endothelial cells. *Process Biochemistry*. 2022;113:258–269. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2022.01.008>
28. Gathercole J, Maes E, Thomas A, Wieliczko R, Grosvenor A, *et al.* Unlocking the bioactivity of meat proteins: Comparison of meat and meat hydrolysate via simulated gastrointestinal digestion. *Journal of Proteomics*. 2023;273:104806. <https://doi.org/10.1016/j.jprot.2022.104806>
29. Baba WN, Baby B, Mudgil P, Gan CY, Vijayan R, *et al.* Pepsin generated camel whey protein hydrolysates with potential antihypertensive properties: Identification and molecular docking of antihypertensive peptides. *LWT*. 2021;143:111135. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111135>
30. Sharma P, Kaur J, Sharma G, Kashyap P. Plant derived antimicrobial peptides: Mechanism of target, isolation techniques, sources and pharmaceutical applications. *Journal of Food Biochemistry*. 2022;46(10):e14348. <https://doi.org/10.1111/jfbc.14348>
31. Cakir B, Tunali-Akbay T. Potential anticarcinogenic effect of goat milk-derived bioactive peptides on HCT-116 human colorectal carcinoma cell line. *Analytical Biochemistry*. 2021;622:114166. <https://doi.org/10.1016/j.ab.2021.114166>
32. Zhao Q, Mu G, Zheng Y, Du W, Zhao A, *et al.* Targeted hydrolysis of  $\alpha$ -lactalbumin to reduce allergenicity based on the synergistic effect of pepsin and papain. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2025;311:144016. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.144016>

33. He W, He K, Sun F, Mu L, Liao S, et al. Effect of heat, enzymatic hydrolysis and acid-alkali treatment on the allergenicity of silkworm pupa protein extract. Food Chemistry. 2021;343:128461. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128461>
34. Stoll VS, Blanchard JS. Buffers: Principles and practice. In: Burgess RR, Deutscher MP, editors. Methods in enzymology. New York: Academic Press; 2009. pp. 43–56. [https://doi.org/10.1016/S0076-6879\(09\)63006-8](https://doi.org/10.1016/S0076-6879(09)63006-8)
35. Montgomery DC. Design and analysis of experiments. 8<sup>th</sup> edition. John Wiley & Sons, Inc.; 2012. 741 p.
36. Belloque J, Chicón R, López-Fandiño R. Unfolding and refolding of  $\beta$ -lactoglobulin subjected to high hydrostatic pressure at different pH values and temperatures and its influence on proteolysis. Journal of Agricultural and Food Chemistry. 2007;55(13):5282–5288. <https://doi.org/10.1021/jf070170w>
37. Ye A, Cui J, Dalgleish D, Singh H. Formation of a structured clot during the gastric digestion of milk: Impact on the rate of protein hydrolysis. Food Hydrocolloids. 2016;52:478–486. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2015.07.023>
38. Mou.écoucou J, Villaume C, Sanchez C, Méjean L.  $\beta$ -Lactoglobulin/polysaccharide interactions during *in vitro* gastric and pancreatic hydrolysis assessed in dialysis bags of different molecular weight cut-offs. 2004;1670(2):105–112. <https://doi.org/10.1016/j.bbagen.2003.10.017>
39. Hoppenreijns LJ, Brune SE, Biedendieck R, Krull R, Boom RM, et al. Fibrillation of  $\beta$ -lactoglobulin at pH 2.0: Impact of cysteine substitution and disulfide bond reduction. Food Hydrocolloids. 2023;141:108727. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2023.108727>
40. Li S, Ye A, Singh H. Impacts of heat-induced changes on milk protein digestibility: A review. International Dairy Journal. 2021;123:105160. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2021.105160>
41. Haas J, Kim JB, Atamer Z, Wu C, Dallas DC. Effects of high-temperature, short-time pasteurization on milk and whey during commercial whey protein concentrate production. Journal of Dairy Science. 2025;108(1):257–271. <https://doi.org/10.3168/jds.2024-25493>
42. Li R, Lund P, Nielsen SB, Lund MN. Formation of whey protein aggregates by partial hydrolysis and reduced thermal treatment. Food Hydrocolloids. 2022;124:107206. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.107206>
43. Luo N, Ye A, Wolber FM, Singh H. Effect of gel structure on the *in vitro* gastrointestinal digestion behaviour of whey protein emulsion gels and the bioaccessibility of capsaicinoids. Molecules. 2021;26(5):1379. <https://doi.org/10.3390/molecules26051379>
44. Sun Q, Fu Y, Wang W. Temperature effects on hydrophobic interactions: Implications for protein unfolding. Chemical Physics. 2022;559:111550. <https://doi.org/10.1016/j.chemphys.2022.111550>
45. Ranadheera CS, Liyanaarachchi WS, Dissanayake M, Chandrapala J, Huppertz T, et al. Impact of shear and pH on properties of casein micelles in milk protein concentrate. LWT. 2019;108:370–376. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.03.090>
46. Ye A. Gastric colloidal behaviour of milk protein as a tool for manipulating nutrient digestion in dairy products and protein emulsions. Food Hydrocolloids. 2021;115:106599. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.106599>
47. Yang M, Ye A, Yang Z, Everett DW, Gilbert EP, et al. Effect of ingestion temperature on the pepsin-induced coagulation and the *in vitro* gastric digestion behavior of milk. Food Hydrocolloids. 2023;139:108550. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2023.108550>
48. Somaratne G, Nau F, Ferrua MJ, Singh J, Ye A, et al. Characterization of egg white gel microstructure and its relationship with pepsin diffusivity. Food Hydrocolloids. 2020;98:105258. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.105258>
49. He X, Yang M, Yuan F, Singh H, Ye A. High-pressure processing of bovine milk: Effects on the coagulation of protein and fat globules during dynamic *in vitro* gastric digestion. Current Research in Food Science. 2022;5:1530–1538. <https://doi.org/10.1016/j.crfs.2022.09.006>
50. Liu Y, Guo R. Aggregation properties of aqueous casein hydrolysate solutions at different pH. International Dairy Journal. 2008;18:1022–1027. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2008.05.005>
51. Egorikhina MN, Semenycheva LL, Chasova VO, Bronnikova II, Rubtsova YP, et al. Changes in the molecular characteristics of bovine and marine collagen in the presence of proteolytic enzymes as a stage used in scaffold formation. Marine Drugs. 2021;19(9):502. <https://doi.org/10.3390/md19090502>
52. Houška M, Landfeld A, Novotná P, Strohalm J, Šupová M, et al. Properties of bovine collagen as influenced by high-pressure processing. Polymers. 2023;15(11):2472. <https://doi.org/10.3390/polym15112472>

#### Additional information about the authors / Дополнительная информация об авторах

Dmitry S. Myagkonosov / Мяконосов Дмитрий Сергеевич ORCID 0000-0003-4443-7573; eLIBRARY SPIN 3806-9937  
 Dmitry V. Abramov / Абрамов Дмитрий Васильевич ORCID 0000-0001-8326-1932; eLIBRARY SPIN 3030-7717  
 Olga G. Kashnikova / Кашникова Ольга Геннадьевна ORCID 0000-0002-7557-6835; eLIBRARY SPIN 1191-7440

<https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-3-2650>  
<https://elibrary.ru/XJPGHS>

Обзорная статья  
<https://fptt.ru>

## Нетермические технологии обработки сырого молока: микробиологическая безопасность и качество



А. Ч. Бурак<sup>1</sup>, А. А. Лукин<sup>2,3,\*</sup>, А. В. Гриценко<sup>2,3</sup>,  
И. В. Тимошук<sup>4</sup>, А. К. Горелкина<sup>4</sup>

<sup>1</sup> ООО «БЕЛРОСАКВА», Минск, Беларусь

<sup>2</sup> Южно-Уральский государственный аграрный университет<sup>ROR</sup>, Челябинск, Россия

<sup>3</sup> Южно-Уральский государственный университет<sup>ROR</sup>, Челябинск, Россия

<sup>4</sup> Кемеровский государственный университет<sup>ROR</sup>, Кемерово, Россия

Поступила в редакцию: 23.04.2026

Принята после рецензирования: 22.06.2026

Принята к публикации: 07.07.2026

\*e-mail: [luhin3415@gmail.com](mailto:luhin3415@gmail.com)

© А. Ч. Бурак, А. А. Лукин, А. В. Гриценко, И. В. Тимошук,  
А. К. Горелкина, 2026



### Аннотация.

Рост спроса на минимально обработанные молочные продукты усиливает необходимость повышения микробиологической безопасности сырого молока при сохранении природного состава, пищевой ценности и органолептических свойств. Цель исследования – комплексно оценить нетепловые технологии и их комбинированные многоступенчатые системы, а также цифровые инструменты сопровождения, применяемые для повышения микробиологической безопасности сырого молока при максимальном сохранении его пищевой, биохимической и сенсорной ценности.

Объектами исследования являлись научные публикации на английском языке, индексируемые в базах Scopus, PubMed и Web of Science, а также на русском языке, представленные в Российском индексе научного цитирования, посвященные нетепловым технологиям обеспечения безопасности и качества сырого молока. Выполнены поиск, отбор релевантных источников и критический анализ результатов по направлениям: ультрафиолетовое излучение, холодная плазма, высокое гидростатическое давление, импульсные электрические поля, микрофильтрация, а также оптимизация режимов с применением методов искусственного интеллекта и цифровая прослеживаемость на основе технологий распределенного реестра.

Установлено, что перечисленные методы способны существенно снижать микробную контаминацию и инактивировать значимые патогены, включая *Escherichia coli* и *Listeria monocytogenes*, при более бережном сохранении витаминов, ферментов и биоактивных белков (в т. ч. лактоферрина), по сравнению с тепловой обработкой. Показано, что наиболее перспективны многоступенчатые синергетические системы, сочетающие физические барьеры и факторы инактивации, что повышает воспроизводимость и позволяет гибко балансировать безопасность и качество. Отмечена важность цифровых инструментов для подбора режимов, предиктивного контроля качества и оптимизации параметров безопасности в цепочке поставок. Нетепловые технологии являются значимым ресурсом повышения безопасности сырого молока при сохранении его качественных характеристик, особенно при использовании комбинированных схем и цифрового мониторинга. Дальнейшие исследования должны быть направлены на унификацию протоколов валидации, сравнение технологий в промышленном масштабе и комплексную оценку влияния на нутриенты, сенсорные свойства и экономику процесса.

**Ключевые слова.** Молочные продукты, патогены, ультрафиолетовое излучение, холодная плазма, высокое гидростатическое давление, импульсные электрические поля, микрофильтрация, искусственный интеллект, цифровая прослеживаемость

**Для цитирования:** Бурак А. Ч., Лукин А. А., Гриценко А. В., Тимошук И. В., Горелкина А. К. Нетермические технологии обработки сырого молока: микробиологическая безопасность и качество. Техника и технология пищевых производств. 2026. Т. 56. № 3. С. 465–480. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-3-2650>



## Non-Thermal Technologies for Raw Milk Processing: Microbiological Safety and Quality



Leonid Ch. Burak<sup>1</sup>, Aleksandr A. Lukin<sup>2,3,\*</sup>,  
Alexander V. Gritsenko<sup>2,3</sup>, Irina V. Timoshchuk<sup>4</sup>,  
Alena K. Gorelkina<sup>4</sup>

<sup>1</sup> LLC BELROSAKVA, Minsk, Belarus

<sup>2</sup> South Ural State Agrarian University<sup>ROR</sup>, Chelyabinsk, Russia

<sup>3</sup> South Ural State University<sup>ROR</sup>, Chelyabinsk, Russia

<sup>4</sup> Kemerovo State University<sup>ROR</sup>, Kemerovo, Russia

Received: 23.04.2026

Revised: 22.06.2026

Accepted: 07.07.2026

\*e-mail: [lukin3415@gmail.com](mailto:lukin3415@gmail.com)

© L.Ch. Burak, A.A. Lukin, A.V. Gritsenko, I.V. Timoshchuk,  
A.K. Gorelkina, 2026



### Abstract.

The growing demand for minimally processed dairy products increases the need to improve the microbiological safety of raw milk while preserving its natural composition, nutritional value, and sensory properties. This review describes key non-thermal processing technologies, combined treatment schemes, and digital tools for quality and traceability management.

The literature analysis encompassed English-language publications indexed in Scopus, PubMed, and Web of Science, as well as Russian-language articles from the Russian Science Citation Index. The evaluation focused on core technologies, including ultraviolet radiation, cold plasma, high hydrostatic pressure, pulsed electric fields, and microfiltration, alongside AI-driven optimization of processing parameters and digital traceability based on distributed ledger technologies.

Compared to conventional thermal treatments, these methods offer superior efficacy in reducing microbial contamination and inactivating major pathogens, such as *Escherichia coli* and *Listeria monocytogenes*, while preserving vitamins, enzymes, and bioactive proteins like lactoferrin. Multistage synergistic systems demonstrate the greatest potential because they combine physical barriers and inactivation mechanisms, thereby increasing process reproducibility and enabling a flexible balance between safety and quality. Furthermore, digital tools facilitate optimal parameter selection, predictive quality control, and the optimization of safety parameters throughout the supply chain.

Non-thermal technologies leveraging combined schemes and digital monitoring enhance raw milk safety while maintaining its natural quality profile. Future research should focus on standardizing validation protocols, evaluating these technologies on an industrial scale, and comprehensively assessing their impact on nutrients, sensory attributes, and process economics.

**Keywords.** Dairy products, pathogens, ultraviolet radiation, cold plasma, high hydrostatic pressure, pulsed electric fields, microfiltration, artificial intelligence, digital traceability

**For citation:** Burak LCh, Lukin AA, Gritsenko AV, Timoshchuk IV, Gorelkina AK. Non-Thermal Technologies for Raw Milk Processing: Microbiological Safety and Quality. Food Processing: Techniques and Technology. 2026;56(3):465–480. (In Russ.) <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-3-2650>

### Введение

Сырое молоко – молоко, не подвергавшееся термической пастеризации, в последние годы вновь привлекает внимание потребителей. Возросший интерес к сырому молоку обусловлен стремлением покупателей к натуральным и минимально обработанным пищевым продуктам, которые более полезны и оказывают благоприятное воздействие на здоровье [1, 2]. Сторонники употребления сырого молока полагают, что отсутствие термической обработки позволяет сохранить термолабильные витамины (В<sub>2</sub>, В<sub>12</sub>, С), природные ферменты и полезную микрофлору, благотворно влияющую

на пищеварение и иммунитет [3]. Однако научная обоснованность этих преимуществ остается предметом дискуссий. Основные вопросы вызывают реальная степень усвоения питательных веществ, эффективность микроорганизмов в регуляции иммунного ответа, а также общая оценка безопасности употребления непастеризованного продукта [4]. До внедрения пастеризации сырое молоко зачастую являлось основной причиной опасных инфекционных заболеваний. В настоящее время, несмотря на совершенствование санитарно-микробиологического контроля и технологий термической обработки молочной продукции, риск

бактериальной контаминации сырого молока патогенными микроорганизмами (*Escherichia coli*, *Listeria monocytogenes*, *Salmonella* spp. и *Campylobacter jejuni*) сохраняется вследствие возможного загрязнения на этапах получения, доения и обращения с сырьем [5, 6]. Микробиологическая обсемененность продукта возможна вследствие субклинического мастита, фекального загрязнения в процессе доения, а также нарушений санитарных правил при транспортировке, хранении и переработке [7]. Пастеризация остается «золотым стандартом» безопасности [8]. Вместе с тем тепловая обработка неизбежно снижает биологическую ценность молока, видоизменяя его вкус и разрушая часть полезных компонентов. Кроме того, данная процедура сопровождается такими нежелательными эффектами, как частичная потеря термолабильных нутриентов, денатурация белков и ферментов, развитие реакций Майяра и ухудшение органолептических качеств, что в целом снижает потребительские свойства продукта и его привлекательность [9, 10]. Оптимальным решением обеспечения микробиологической стабильности, максимального сохранения органолептических свойств и пищевой ценности научное сообщество признает использование нетепловых методов обработки. Такие технологии способны инактивировать патогенные микроорганизмы при низких температурах за счет действия различных механизмов, включая электропорацию клеточных мембран, повреждение ДНК и генерацию активных форм кислорода, при этом обеспечивая максимальное сохранение биологически активных веществ и органолептических свойств продукта [11]. К таким нетермическим технологиям относятся ультрафиолетовое излучение (УФ-С), холодная плазма (ХП), обработка высоким гидростатическим давлением (ВГД), импульсное электрическое поле (ИЭП) и микрофильтрация (МФ). Современные научные исследования сфокусированы на многоступенчатых комбинированных системах (например ВГД + ИЭП и МФ + УФ-С), обеспечивающих высокую микробиологическую безопасность продукта за счет технологической синергии [12–14]. Новые перспективные возможности предлагает цифровая трансформация: применение искусственного интеллекта для онлайн-оптимизации процессов, блокчейна для обеспечения прослеживаемости продукции и нанотехнологий для модернизации фильтрационных систем [15–17]. Несмотря на обширный массив публикаций, существующие обзоры, как правило, ограничены либо отдельными нетепловыми методами, либо их микробиологическим воздействием, либо общими вопросами цифровизации отрасли. Наблюдается дефицит системных работ, объединяющих анализ физических методов, ИТ-инструментов и гибридных подходов к безопасности сырого молока в контексте технологических, экономических, экологических и социальных факторов. Следовательно, необходим системный обзор, который позволит оценить не только эффективность отдельных технологий,

но и их практическую реализуемость, масштабируемость и потенциал внедрения в современных молочных цепях поставок. Цель исследования – комплексно оценить нетепловые технологии и их комбинированные многоступенчатые системы, а также цифровые инструменты сопровождения, применяемые для повышения микробиологической безопасности сырого молока при максимальном сохранении его пищевой, биохимической и сенсорной ценности. Для достижения поставленной цели определены следующие исследовательские вопросы:

1. Какие нетепловые технологии наиболее эффективны для инактивации патогенных микроорганизмов в сыром молоке и каковы механизмы их антимикробного действия?
2. В какой степени эти технологии позволяют сохранить качество сырого молока, включая его питательную ценность, биоактивные компоненты и сенсорные характеристики, по сравнению с традиционной пастеризацией?
3. Насколько результативны многоступенчатые комбинированные подходы относительно отдельных технологий и обеспечивают ли они необходимый для промышленного применения уровень микробиологической безопасности?
4. Какую роль играют цифровые инструменты, включая искусственный интеллект, блокчейн и смежные решения, в оптимизации технологических параметров, мониторинге процессов и прослеживаемости продукции?
5. Какие технологические, экономические, экологические, нормативные и социальные факторы определяют масштабируемость и практическую осуществимость внедрения этих решений в молочную отрасль?

#### Объекты и методы исследования

Объектами исследования являлись научные публикации за период 2015–2026 гг., посвященные нетепловым технологиям обеспечения микробиологической безопасности и качества сырого молока. Рассматривались источники на английском языке, индексируемые в базах Scopus, PubMed и Web of Science, а также публикации на русском языке, представленные в Российском индексе научного цитирования (РИНЦ).

Исследование выполнено в формате критического тематического обзора. Проведены поиск, отбор источников и анализ результатов по следующим направлениям: ультрафиолетовое излучение (в т. ч. диапазон УФ-С), холодная плазма, высокое гидростатическое давление, импульсные электрические поля, микрофильтрация. Дополнительно рассмотрены перспективные подходы, включая нанотехнологические решения для фильтрации и барьерных материалов, оптимизацию режимов обработки с применением методов искусственного интеллекта, а также цифровую прослеживаемость на основе технологий распределенного реестра.

Поиск осуществляли по ключевым словам и их сочетаниям с применением логических операторов AND/OR. Использовали русскоязычные и англоязычные термины, отражающие объект исследования (сырое молоко / raw milk / unpasteurized milk), тип обработки (нетепловая обработка / non-thermal processing), а также конкретные технологии (UV-C, cold plasma, HPP, PEF, microfiltration). Для расширения охвата выполняли дополнительный поиск по спискам литературы наиболее релевантных публикаций.

Критерии включения: научные публикации за 2015–2026 гг., содержащие экспериментальные данные или технологический анализ применения указанных нетепловых методов к сырому молоку и / или оценку показателей безопасности и качества.

Критерии исключения: дублирующиеся записи; работы, не относящиеся к сырому молоку; публикации, посвященные исключительно термической обработке без рассмотрения нетепловых альтернатив; источники с недостаточным описанием методов и результатов для последующего анализа.

Сопоставление результатов проводили по следующим группам показателей: микробиологическая эффективность, влияние на нутриенты и биоактивные компоненты, а также технологическая реализуемость и ограничения масштабирования.

## Результаты и их обсуждение

**Проблемы, связанные с традиционной термической пастеризацией.** Термическая пастеризация, обычно реализуемая как высокотемпературная кратковременная обработка (HTST; 72–75 °C в течение 15–20 с) или ультравысокотемпературная обработка (UHT; 135–150 °C в течение 1–4 с), остается базовым методом обеспечения безопасности молочной продукции благодаря высокой эффективности инактивации вегетативных патогенных микроорганизмов и частичной инактивации ферментов порчи, что способствует увеличению срока годности [18, 19]. Вместе с тем под действием высокой температуры происходит изменение пищевой ценности и органолептических свойств молока. Основным недостатком термического воздействия – разрушение чувствительных к нагреву веществ и изменение свойства белков. Наиболее чувствительны к действию высоких температур водорастворимые витамины: при интенсивном нагреве снижается содержание витамина С и части витаминов группы В, причем степень потерь зависит от режима обработки и исходного состава молока [20, 21]. Одновременно изменяется активность эндогенных ферментных систем молока (липопротеинлипазы, плазмина, щелочной фосфатазы), что может сказываться на стабильности продукта при хранении и последующей переработке [22, 23]. Значимой проблемой термообработки является уменьшение доли биоактивных белков – иммуноглобулинов, лактоферрина и лактопероксидазы, которые участвуют

в защите от микробов и поддержке иммунных функций; под действием высоких температур они частично разрушаются, что подтверждается рядом исследований [24]. Кроме того, термическая обработка значительно изменяет микробиоту молока [25].

Нагревание влияет на вкус, запах и цвет молока вследствие денатурации белков, протекания реакции Майяра (между лактозой и аминокетонами, в т. ч. лизин) и окисления липидов. В результате могут появляться характерные «вареные» и сернистые ноты, а также изменения оттенка, более выраженные для УНТ по сравнению с HTST [24, 26]. С физико-химической точки зрения денатурация сывороточных белков и перестройка казеиновых мицелл способны повышать вязкость и в отдельных случаях приводить к образованию осадка при хранении [27]. Термические процессы энергоемки и требуют циклов нагрева и охлаждения, что увеличивает ресурсную нагрузку производства и его вклад в углеродный след отрасли [28]. В совокупности потери термочувствительных компонентов, изменения сенсорных свойств и экологические издержки усиливают интерес к нетепловым альтернативам, обеспечивающим микробиологическую безопасность при более мягком воздействии на качество продукта [29].

**Современные нетепловые методы повышения безопасности сырого молока.** На фоне роста ожиданий потребителей и ужесточения требований к безопасности пищевой продукции активно развиваются нетепловые технологии обработки сырого молока, ориентированные на снижение микробной нагрузки при сохранении пищевой ценности и органолептических показателей [30]. Эти методы различаются по механизмам инактивации микроорганизмов, эффективности в отношении отдельных групп патогенов и уровню технологической готовности. Основные показатели эффективности, влияние на качество и возможность практического внедрения нетермических методов обработки представлены в таблице 1.

**Современные технологии нетепловой обработки.**  
**Ультрафиолетовое облучение (УФ-С)** (200–280 нм, наиболее часто около 254 нм) снижает микробную обсемененность преимущественно благодаря фотохимическому повреждению ДНК и нарушению репликации [31, 32]. Основным технологическим ограничением для молока является высокая мутность, уменьшающая глубину проникновения излучения. Поэтому для достижения стабильного эффекта применяют тонкопленочные и проточные реакторы, обеспечивающие малую толщину слоя и эффективное перемешивание [33, 34]. В зависимости от дозы и конструкции установки описывают снижение численности микроорганизмов в диапазоне  $\sim 1\text{--}6 \log_{10}$  КОЕ/мл, включая *Listeria monocytogenes* и *Escherichia coli* [35]. Преимуществом УФ-С по сравнению с тепловой пастеризацией выступает потенциал лучшего сохранения органолептики и части биоактивных белков, однако эффект существенно зависит от дозы: при завышенных

Таблица 1. Сравнительный обзор основных показателей эффективности существующих нетепловых технологий

Table 1. Performance indicators of non-thermal technologies: Comparative analysis

| Критерий                                                   | Ультрафиолетовое излучение                                                  | Холодная плазма                                                              | Высокое гидростатическое давление                                                   | Импульсное электрическое поле                         | Микрофилтрация                                                           |
|------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|
| Снижение микробиологической обсемененности ( $\log_{10}$ ) | 1–6; ограничено мутностью, важна конструкция реактора                       | 3–5; зависит от режима и матричного эффекта                                  | Обычно $\geq 5$ для вегетативных форм; споры более устойчивы                        | 4–5; зависит от поля, удельной энергии и температуры  | Обычно $\geq 3$ ; физическое удаление; эффективна в обезжиренной фракции |
| Влияние на качество                                        | Обычно минимальное; при высоких дозах возможны свет-индуцированные привкусы | В целом умеренное; при жестких режимах возможен рост окислительных процессов | Часто близко к свежему; возможны изменения белковой системы при интенсивных режимах | Минимальные изменения при контроле омического нагрева | Свежий вкус; чаще применяют к обезжиренному молоку                       |
| Энергопотребление                                          | Умеренно низкое                                                             | Умеренное                                                                    | Высокое                                                                             | Умеренно высокое                                      | Умеренное                                                                |
| Затраты (капитальные / эксплуатационные)                   | Умеренно низкие                                                             | Умеренные                                                                    | Очень высокие                                                                       | Высокие                                               | Умеренно высокие                                                         |
| Технологическая готовность для промышленного внедрения     | 7–9                                                                         | 5–7                                                                          | 8–9                                                                                 | 6–8                                                   | 8–9                                                                      |

дозах возможны свет-индуцированные дефекты вкуса, связанные с образованием летучих соединений. Кроме того, эффективность против спор ограничена, поэтому УФ-С чаще рассматривают в качестве компонента комбинированных схем (например совместно с микрофилтрацией) [34, 36].

**Холодная плазма.** Холодная плазма представляет собой частично ионизированный газ, в котором антимикробный эффект связан с действием реактивных форм кислорода и азота, а также заряженных частиц, вызывающих повреждение мембран, биополимеров и нуклеиновых кислот [37–39]. В ряде работ показано снижение численности микроорганизмов на несколько  $\log_{10}$  в течение трех минут, при этом характер изменений качества зависит от режима и состава молока. Согласно данным Н. М. Abbas *et al.*, обработка молока холодной плазмой обеспечивала более низкие уровни общей микрофлоры и колиформ по сравнению с пастеризованным и сырым молоком при хранении при 4 °С в течение 7 суток, что указывает на потенциал технологии для повышения микробиологической стабильности [40]. Вместе с тем для холодной плазмы сохраняются ограничения, связанные с неоднородностью воздействия в непрозрачных матрицах и рисками окислительных изменений, что требует оптимизации параметров и конструкции реактора.

**Обработка высоким гидростатическим давлением (ВГД).** Обработка молока ВГД (400–600 МПа) способствует эффективной инаktivации микрофлоры,

обеспечивая при этом максимальное сохранение органолептических свойств продукта [41, 42]. Установлено, что действие в течение нескольких минут при 600 МПа снижает численность вегетативных форм на 5  $\log_{10}$  КОЕ/мл. Однако бактериальные споры обладают значительной резистентностью, поэтому, как правило, требуются комбинированные методы обработки [43–45].

Существенным ограничением ВГД является его недостаточная эффективность против спор: повышение давления или времени обработки для их инаktivации ведет к росту энергозатрат и снижению производительности в промышленных масштабах [44]. Тем не менее способность ВГД сохранять исходную пищевую ценность и вкусовой профиль молока остается его ключевым преимуществом [45]. В отличие от классической пастеризации, данная технология способствует сохранению термолабильных витаминов и биоактивных белков, таких как лактоферрин и иммуноглобулины [46, 47]. Дегустационная оценка подтверждает, что молоко после ВГД-обработки практически идентично свежему. Помимо продления срока годности и сокращения пищевых отходов, технология ВГД обладает экологическим преимуществом за счет более низкого энергопотребления по сравнению с традиционной термической обработкой [48].

**Импульсное электрическое поле (ИЭП).** Воздействие импульсных электрических полей вызывает электропорацию мембран микробных клеток, что при-



водит к их необратимой инактивации [49, 50]. Эффективность процесса напрямую коррелирует с напряженностью поля, длительностью импульсов, удельной энергией и температурой обработки. Результаты исследований показали, что обработка ИЭП при параметрах 35 кВ/см, 100 импульсов и температуре 40 °C способствовала снижению обсемененности *E. coli* 4–5 log<sub>10</sub> КОЕ/мл [51]. Для достижения стабильно высоких уровней инактивации требуется прецизионный контроль омического нагрева и обеспечение однородности обработки потока. Основным ограничением метода остается низкая результативность в отношении спор, в связи с чем ИЭП часто интегрируют в гибридные схемы, что может затруднять масштабирование технологии и увеличивать эксплуатационные расходы [52]. Технология ИЭП также изучается на предмет потенциального применения для регулирования ферментативной активности в молоке: ИЭП может эффективно снижать активность таких ферментов, как ксантиноксидаза и липаза, лишь незначительно влияя на плазмин, участвующий в расщеплении молочных белков [53]. Обработка ИЭП обеспечивает высокую сохранность органолептических свойств сырого молока – естественного вкуса, цвета и текстуры. Сенсорные оценки часто показывают, что молоко, обработанное ИЭП, неотличимо от свежего. С точки зрения воздействия на окружающую среду, технология ИЭП способствует достижению целей устойчивого развития за счет снижения энергопотребления по сравнению с традиционной пастеризацией и минимизации пищевых отходов [54]. Кроме того, обработка ИЭП позволяет сохранить около 94 % термочувствительных витаминов групп А и В [55].

**Микрофилтрация (МФ).** Применение МФ позволяет физически удалить из молока микроорганизмы, а также часть споровой микрофлоры за счет мембранного разделения. На практике оборудование для МФ удобно встраивать в технологическую линию. Следует отметить, что процесс наиболее эффективен при обработке обезжиренной фракции молока [56]. Преимущественно перспективным является комбинирование МФ с другими нетепловыми методами обработки,

такими как ультразвук или УФ-С излучение. В отличие от термической пастеризации, такие гибридные схемы способствуют обеспечению микробиологической стабильности и более эффективному сохранению биологически активных веществ. Согласно данным Y. Liu *et al.* [57], сочетание МФ с УФ-С или ультразвуком позволяет сохранить долю нативных белков в большей степени, чем комбинация МФ с высокотемпературной кратковременной пастеризацией (HTST); при этом микробная обсемененность снижается до неопределяемого уровня, а срок годности увеличивается до 40 суток. Исследование W. Zhang *et al.* [58] также свидетельствует о том, что по сравнению со стандартной пастеризацией HTST применение МФ совместно с ультразвуком способствует увеличению срока хранения и максимальному сохранению пищевой ценности молока.

В таблице 2 показана эффективность комбинированной МФ в сочетании с ультразвуковой технологией для сырого обезжиренного молока. Исследования демонстрируют, что молочная фракция сохраняет важные биоактивные соединения, такие как лактоферрин и иммуноглобулины, и поддерживает свежий вкус и аромат молока [59, 60]. Комбинирование МФ с ультразвуком снижает бактериальную нагрузку более выражено, чем HTST и МФ по отдельности, при умеренном снижении общего белка [58].

**Перспективные направления развития нетепловых технологий и цифровизации молочной цепочки. Системы фильтрации, усовершенствованные с помощью нанотехнологий.** Модифицированные фильтрационные системы предполагают использование наноматериалов для повышения эффективности разделения и селективности мембран, что потенциально позволяет удалять загрязняющие вещества и патогены без выраженной потери ценных компонентов молока [61]. В качестве примеров рассматриваются наночастицы серебра (Ag-NPs) как антимикробные модификаторы мембран, а также углеродные нанотрубки (CNTs), способные повысить механическую прочность и транспортно-селективные свойства мембранных

Таблица 2. Синергетический эффект микрофилтрации в сочетании с ультразвуковой обработкой [58]

Table 2. Synergistic effect of microfiltration combined with ultrasonic treatment [58]

| Условия обработки                             | Общее содержание белка, мг/мл | Общее количество бактерий, log <sub>10</sub> КОЕ/мл | Бактериальные споры, log <sub>10</sub> КОЕ/мл |
|-----------------------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| Сырое обезжиренное молоко (контроль)          | 36,0 ± 0,4                    | 6,16 ± 0,02                                         | 3,69 ± 0,01                                   |
| Высокотемпературная кратковременная обработка | 35,7 ± 0,2                    | 4,02 ± 0,09                                         | 3,64 ± 0,01                                   |
| Микрофилтрация                                | 35,2 ± 0,1                    | 2,46 ± 0,02                                         | не обнаружены                                 |
| Микрофилтрация + ультразвук (432 Дж/мл)       | 34,2 ± 0,3                    | 1,73 ± 0,04                                         | не обнаружены                                 |
| Микрофилтрация + ультразвук (1296 Дж/мл)      | 34,0 ± 1,0                    | не обнаружены                                       | не обнаружены                                 |

материалов [62]. Самостоятельным вектором развития является использование нанотехнологий для инкапсуляции и защиты биоактивных компонентов, что минимизирует деградацию чувствительных нутриентов в процессах переработки и хранения [63].

Параллельно с этим внедрение наноматериалов в пищевой сектор сопряжено с серьезными барьерами в области безопасности, правового регулирования и экономической целесообразности. Ключевым риском признается потенциальная миграция наночастиц (в частности Ag и  $\text{TiO}_2$ ) в пищевой продукт, а также дефицит данных о долгосрочном токсикологическом профиле при их систематическом употреблении. Надзорные ведомства (например FDA и EFSA) пока не разработали единых специфических регламентов для искусственно созданных наноматериалов (ENM), контактирующих с пищей, что препятствует их широкому внедрению [64]. Ситуацию усугубляет отсутствие стандартизированных протоколов обнаружения и количественного анализа ENM в сложных матрицах, таких как молоко, что затрудняет объективную оценку рисков и сопоставимость результатов различных исследований [65]. С практической точки зрения процедура получения разрешений (например статуса GRAS или заключений EFSA) требует масштабных и дорогостоящих токсикологических тестов. Высокие материальные затраты и необходимость приобретения специализированного оборудования являются существенным барьером для широкого промышленного внедрения, а также ограничивают возможность для использования на малых предприятиях [62].

**Технологии искусственного интеллекта.** В настоящее время технологии искусственного интеллекта (ИИ), включая методы машинного и глубокого обучения, а также анализ данных в реальном времени, научное сообщество рассматривает как эффективный инструмент для более точного контроля качества сырого молока и повышения эффективности производства [17, 66]. ИИ способен обеспечивать непрерывный мониторинг ключевых показателей качества продукта (рН, мутности и др.) за счет подключения устройства интернета вещей (IoT) и датчиков, что позволяет своевременно выявлять отклонения и оперативно оценивать риски микробиологической обсемененности [67]. В рамках прогнозной аналитики модели машинного обучения (например комбинированные методы для классификации риска порчи или регрессионные модели для прогноза срока годности) позволяют работать со сложными многомерными наборами данных [68, 69]. Для управления процессами в реальном времени перспективны подходы обучения с подкреплением, при которых параметры обработки (например доза УФ-С или режим ВГД) могут динамически корректироваться на основе потоков данных от датчиков и заданных критериев оптимизации [70, 71]. В качестве примера прикладного применения описываются цифровые платформы, предоставляющие рекомендации в реальном времени

для снижения потерь и повышения технологических выходов в молочной переработке [17]. Несмотря на высокий потенциал, внедрение ИИ сдерживается рядом факторов: сложностью интерпретации моделей, что затрудняет валидацию и регуляторное обоснование; потребностью в больших, качественных и репрезентативных размеченных данных; рисками алгоритмической предвзятости, а также вопросами конфиденциальности и владения данными. Дополнительными барьерами являются необходимость значительных капитальных вложений в инфраструктуру (датчики, системы связи, вычислительные мощности) и недостаточная подготовка персонала, что особенно критично для малых и средних предприятий.

**Обеспечение прослеживаемости технологией блокчейн.** Блокчейн представляет собой распределенный реестр, в котором записи невозможно незаметно изменить или удалить. В молочной отрасли данная технология способствует повышению прозрачности и достоверности данных о движении продукции по цепочке «от фермы до потребителя» [43, 72]. Интеграция блокчейна с IoT позволяет автоматически фиксировать и передавать в систему такие параметры, как температурные режимы при хранении и транспортировке, а также отдельные микробиологические показатели, что облегчает контроль рисков и повышает качество прослеживаемости [74]. За счет защищенного хранения и верификации записей блокчейн также рассматривается как инструмент снижения вероятности фальсификации и уменьшения числа ошибок при маркировке товаров [75, 76]. В прикладном аспекте выделяются как публичные, так и корпоративные решения (платформы Ethereum и Hyperledger Fabric), которые уже интегрируются в цепочки поставок [74, 76]. Однако широкое внедрение технологии ограничено рядом технических и организационных факторов: проблемы масштабируемости при высокой интенсивности регистрации событий; значительное энергопотребление отдельных алгоритмов консенсуса; сложность обеспечения совместимости различных платформ с действующими ИТ-системами предприятий; а также отсутствие унифицированных стандартов в области форматов данных и протоколов доступа.

Существенным препятствием являются стартовые инвестиции в датчики, связь и системную интеграцию [77]. С регуляторной точки зрения сохраняются вопросы соответствия требованиям защиты персональных и коммерчески чувствительных данных (например GDPR в ЕС), поскольку принцип неизменяемости записей может конфликтовать с требованиями корректировки / удаления данных, а различия в регуляторных требованиях к глубине и типу прослеживаемости повышают риск несовместимости решений между участниками цепочки и надзорными органами [75].

**Сравнительный анализ и синергия. Интегрированная система оценки.** Критический анализ отдельных нетепловых технологий показывает, что

их практическое внедрение зависит от множества факторов. В связи с этим необходима интегрированная система оценки, учитывающая ключевые критерии: эффективность инактивации микроорганизмов, сохранение пищевой ценности и органолептических свойств, экономические затраты, энергопотребление, воздействие на окружающую среду и технологическую готовность [9, 28]. Рассмотрение различных методов свидетельствует об отсутствии универсальной технологии. Выбор оптимального решения всегда определяется контекстом и приоритетами конкретного производства – обеспечением безопасности, достиганием эффективности, сопоставимой с традиционной пастеризацией, максимальным сохранением биологически активных веществ или экономически обоснованным увеличением срока годности. Например, обработка высоким гидростатическим давлением сочетает высокую эффективность инактивации патогенов и оптимальную сохранность нативных свойств продукта, однако его внедрение требует значительных капитальных вложений, а периодический режим обработки ограничивает производительность технологического процесса [78]. Относительная экономичность УФ-С облучения снижается из-за проблем при обработках мутных сред и риска изменения вкуса и запаха продукта [79].

**Анализ баланса между эффективностью и качеством.** Выбор нетермических методов обработки сырого молока связан с необходимостью балансировать между микробиологической эффективностью, качеством готового продукта и затратами, что напрямую определяет целесообразность внедрения. Для инактивации патогенных микроорганизмов ВГД обеспечивает снижение их численности более чем на десять порядков, что практически равнозначно традиционной пастеризации [43]. Напротив, для обеспечения микробиологической стабильности методами ИЭП и УФ-С зачастую необходима точная настройка параметров либо включения их в многоступенчатые (гибридные) процессы [52]. Хотя нетермические методы в целом более эффективно сохраняют пищевую ценность по сравнению с термической пастеризацией, их влияние на компоненты молока различается. ВГД и ИЭП, как правило, в большей степени сохраняют нативные структуры белков, тогда как холодная плазма (ХП) за счет реактивных частиц может модифицировать белки, но одновременно повышается риск окисления липидов [40]. Следует отметить, что максимальное сохранение нутриентов не всегда означает более высокое потребительское принятие или улучшение функциональных свойств. Например, при недостаточно контролируемой обработке ХП возможно появление посторонних привкусов, что при эффективном сохранении пищевой ценности ухудшает органолептические свойства и восприятие продукта. МФ эффективно сохраняет нутриенты в обезжиренном молоке, однако в цельном молоке может быть менее результативна

против патогенов и слабее инактивировать микробные токсины [57]. Кроме того, хотя ВГД способствует сохранению иммуноглобулинов, высокое давление влечет за собой небольшие конформационные изменения, потенциально снижающие сродство к антигенам или иммуномодулирующую активность [79].

**Анализ экономических и экологических аспектов.** С экономической точки зрения такие технологии, как УФ-С и МФ, более приемлемы для внедрения благодаря их совместимости с непрерывными технологическими линиями и более низким относительным капитальным затратам [80]. В отличие от них, обработка под ВГД и крупномасштабная обработка методом ИЭП потребует значительных инвестиций, оправданных в первую очередь для крупных производителей или премиальных продуктовых линий [81]. В рамках экологического аспекта нетермические методы обработки, как правило, менее энергоемки, чем термические процессы. Однако для учета косвенных воздействий, таких как производство и утилизация наноматериалов в улучшенной фильтрации или энергоемкость компрессоров ВГД, необходима оценка полного цикла [82]. Увеличение срока годности (до 30–40 суток для молока, обработанного методами ВГД и МФ) дает значительное косвенное экологическое преимущество за счет сокращения объемов пищевых отходов. Тем не менее этот эффект необходимо сопоставлять с повышенными затратами энергии и ресурсов на обслуживание более сложного технологического оборудования [47].

#### **Комбинирование нетермических технологий.**

Интеграция нетепловых технологий в многоступенчатые системы знаменует собой смену парадигмы в консервировании сырого молока. Комбинирование нескольких нетермических методов обработки может обеспечить синергетический эффект, способствуя повышению микробиологической безопасности при максимальном сохранении нутриентного состава и органолептических показателей продукта. Пилотные исследования показывают, что сочетание высокого гидростатического давления (400–600 МПа) с импульсными электрическими полями (20–50 кВ/см) способно обеспечивать снижение численности патогенов *E. coli* и *L. monocytogenes* более чем на  $6 \log_{10}$  КОЕ/мл [83]. Аналогично в лабораторных условиях продемонстрировано, что комбинирование МФ с УФ-С-облучением позволяет снизить обсемененность обезжиренного молока до уровня ниже предела обнаружения, одновременно увеличивая срок годности до 40 суток [84]. Вместе с тем следует учитывать, что доказательная база по синергетическому действию таких комбинаций пока в основном ограничена результатами лабораторных и пилотных испытаний. Для их широкого внедрения необходимо проведение промышленных испытаний и комплексная технико-экономическая оценка, включая анализ рентабельности. Переход от перспективных пилотных проектов к коммерчески жизнеспособным процессам, одобренным регулирующими органами,

требует разработки четкой дорожной карты валидации. В таблице 3 приведена структурированная дорожная карта валидации нетепловых и многоступенчатых процессов. Она служит систематической основой для достижения нормативного соответствия традиционной пастеризации, гарантируя стабильные показатели безопасности и качества продукта. Данная карта включает: а) определение «наихудшего сценария» обсеменения сырого молока патогенами (включая устойчивые штаммы *L. monocytogenes* и *E. coli* O157:H7); б) проведение испытаний в потребительской упаковке при минимальных и максимальных параметрах обработки; в) подтверждение снижения содержания патогенных микроорганизмов минимум на 5 порядков (5-log reduction) в течение всего срока годности; г) документирование критических показателей качества (сохранение биоактивных белков, органолептический профиль) при валидированных режимах. Такой подход отвечает принципам валидации, установленным регулируемыми органами, и доказывает, что процесс позволяет стабильно получать продукт, соответствующий заданным требованиям.

Несмотря на многообещающие результаты, широкое внедрение многоступенчатых технологий сталкивается со значительными проблемами. Основные барьеры включают существенные капиталовложения в интегрированные системы; при этом оценки стоимости конфигураций ВГД + ИЭП варьируются от 1 до 3 млн долларов. [78]. Кроме того, существует острая необходимость в стандартизированных протоколах валидации для обеспечения равномерного и предсказуемого снижения численности патогенов при различных комбинациях технологий. Регулирую-

щие органы требуют снижения количества ключевых патогенов минимум на 5 порядков для нетермических процессов, чтобы они считались эквивалентными традиционной пастеризации. Это требует всесторонней валидации для каждой конфигурации многоступенчатой системы [85].

**Социально-экономические и экологические последствия нетепловых технологий.** Внедрение нетермических технологий обработки молока следует рассматривать не только как инструмент повышения технологической эффективности, но и как значимый фактор формирования социально-экономических и экологических эффектов в молочной отрасли. Применение данных технологий создает дополнительные экономические возможности, прежде всего за счет дифференциации продукции и формирования ее более высокой потребительской ценности. Молоко, обработанное методами ВГД и ИЭП, нередко воспринимается как более свежее и обладающее более высокой пищевой ценностью, что позволяет производителям реализовывать такую продукцию по премиальной цене – в среднем на 10–20 % выше по сравнению с молоком, подвергнутым традиционной пастеризации [48]. Вместе с тем существенные капитальные затраты на приобретение и внедрение соответствующего оборудования выступают значимым ограничивающим фактором, особенно для малых и средних предприятий, и потенциально могут усиливать структурное экономическое неравенство в отрасли. В связи с этим масштабирование нетермических технологий, вероятно, потребует разработки и внедрения адаптивных финансовых механизмов, включая модели совместного распределения издержек, льготное финансирование и целевые меры

Таблица 3. План валидации для нетепловых и многоступенчатых процессов

Table 3. Validation plan for non-thermal and multi-stage processes

| Фаза             | Этап                                     | Описание                                                                                    | Соответствие нормативным требованиям                           | Источник              |
|------------------|------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|-----------------------|
| Определение      | Опасные факторы / КТП                    | Идентификация ключевых патогенов и критических технологических параметров                   | Отражение реальных угроз биологической безопасности            | [85]                  |
| Испытание        | Инокуляционное исследование              | Тестирование с высокой концентрацией микроорганизмов при минимальных КТП                    | Валидация сценария «наихудшего случая»                         | [86]                  |
| Верификация      | Микробиологический и качественный анализ | Снижение популяции $\geq 5 \log_{10}$ КОЕ/мл + сохранение качества в течение срока годности | Подтверждение безопасности и стабильности продукта             | Рекомендации FDA/EFSA |
| Документирование | Досье / масштабирование                  | Сбор данных для перехода от пилотного проекта к промышленному производству                  | Доказательная база, готовая к представлению в надзорные органы | [82]                  |

Примечание: КТП – критические технологические параметры (в контексте систем HACCP).

Note: КТП – stands for Critical Technological Parameters in HACCP systems.



государственной поддержки [78]. Не менее важным условием рыночного успеха является формирование информированного потребительского спроса: согласно имеющимся данным, 65–75 % потребителей демонстрируют более высокую готовность приобретать молоко, обработанное нетермическими способами, при условии четкой и научно обоснованной коммуникации его преимуществ с точки зрения безопасности и пищевой ценности [87]. Дополнительное усиление социально-экономических эффектов обеспечивается за счет цифровой интеграции производственно-сбытовых процессов. В частности, применение технологии блокчейн способствует повышению прозрачности цепей поставок, снижению рисков фальсификации и укреплению доверия со стороны потребителей. Переход к инновационным технологическим решениям стимулирует развитие новых сегментов рынка труда, ориентированных на обслуживание систем искусственного интеллекта, цифровой мониторинг и аналитическую обработку данных [88]. С экологической точки зрения нетермические методы во многом соответствуют принципам циркулярной экономики и ресурсосберегающего производства. Установлено, что обработка ВГД может снижать энергопотребление до 50 % по сравнению с ультравысокотемпературной обработкой (УНТ), в то время как ХП и УФ-С-облучение позволяют минимизировать либо полностью исключить применение химических консервантов [78]. Одним из наиболее значимых экологических эффектов является увеличение срока хранения молочной продукции. Сочетание обработки ВГД и МФ сохраняет молоко в течение 30–40 суток, что способствует сокращению объемов пищевых отходов. По данным результатов пилотных исследований, использование подобных технологических комбинаций может снижать потери молочной продукции до 20 % [47]. Существенным фактором также выступает водосберегающий потенциал современных фильтрационных решений: применение самоочищающихся наномембран уменьшает расход воды в процессах безразборной мойки оборудования (CIP) на 15–25 %. Несмотря на явные преимущества, экологическая результативность нетермических технологий не является безусловной и должна оцениваться комплексно на основе анализа жизненного цикла (LCA) с учетом энергозатрат, расхода воды, материалов и образования отходов на всех стадиях производства. Особого внимания заслуживают потенциальные экологические риски, связанные с производством, эксплуатацией и утилизацией наноматериалов, применяемых в усовершенствованных фильтрационных системах. Количественная оценка данных рисков представляется необходимым условием для подтверждения того, что суммарный экологический эффект внедрения указанных технологий действительно остается положительным в долгосрочной перспективе [87].

**Нормативно-правовые аспекты и отраслевые стандарты.** Нормативно-правовое регулирование

производства и обращения сырого молока существенно варьирует между ключевыми мировыми рынками, что отражает различия в приоритетах защиты потребителей и отраслевых практиках [89]. В связи с этим возрастает потребность в международной стандартизации протоколов безопасности, особенно применительно к новым нетермическим технологиям обработки. В ЕС производство и реализация сырого молока осуществляются в соответствии с Регламентом (ЕС) № 853/2004, устанавливающим комплексные гигиенические требования и критерии безопасности [89]. Напротив, в США нормативное обеспечение оборота сырого молока реализуется преимущественно на уровне штатов, что обуславливает значительную неоднородность нормативных требований. Производство, хранение, перевозку и реализацию сырого молока в ЕАЭС регулирует Технический регламент Таможенного союза ТР ТС 033/2013 «О безопасности молока и молочной продукции», который устанавливает обязательные требования к сырому молоку, процессам его получения, транспортировки и маркировке. По мере расширения применения нетермических технологий ожидается адаптация действующих регуляторных рамок с включением специализированных процедур оценки безопасности и эффективности. Так, в настоящее время, FDA рассматривает обработку ВГД как безопасный метод инактивации патогенов. Необходимо отметить, что для заявления об эквивалентности ВГД пастеризации необходима экспериментальная валидация, подтверждающая снижение целевых патогенов не менее чем на  $5 \log_{10}$  КОЕ/мл. EFSA допускает использование УФ-С-облучения для обработки молока после пастеризации при соблюдении установленных условий. Для других нетермических методов обработки, включая холодную плазму и МФ с применением нанотехнологий, регуляторный статус остается менее определенным. В зависимости от конструкции процесса и используемых материалов такие технологии могут квалифицироваться либо как новые методы пищевой обработки, либо как технологии / материалы, контактирующие с пищевой продукцией, что предполагает проведение комплексной оценки безопасности. При этом унифицированные протоколы для подобных оценок во многих случаях отсутствуют.

Несоответствие нормативных требований в разных странах формирует существенные барьеры для международной торговли и потенциально повышает риски для потребителей. В связи с этим разработка и внедрение стандартов для нетермических технологий представляются критически важными для снижения неопределенности и унификации мер по обеспечению безопасности пищевых продуктов. Наряду с нормативными требованиями необходимо создание согласованных, технологически нейтральных протоколов валидации для нетермических и многостадийных процессов. Такие протоколы должны позволять производителям обоснованно демонстрировать достижение

целевого уровня инактивации микроорганизмов, сопоставимого с пастеризацией. Основными решениями должны стать гармонизация критериев микробиологической безопасности с учетом рекомендаций FDA, EFSA и ВОЗ, а также разработка процедур валидации для многоступенчатых технологических процессов.

### Выводы

Современная мировая молочная промышленность сталкивается с необходимостью обеспечения баланса между потребительским спросом на минимально обработанное сырое молоко, обладающее высокой питательной ценностью, и соблюдением строгих стандартов безопасности. Нетермические технологии, включая УФ-излучения (диапазона С), холодную плазму, обработку высоким давлением, воздействие импульсным электрическим полем и микрофильтрацию, наряду с внедрением нанотехнологий, искусственного интеллекта (ИИ) и блокчейна, открывают принципиально новые возможности для отрасли. Данные методы позволяют существенно снизить концентрацию патогенных микроорганизмов, максимально сохраняя биологически активные компоненты и органолептические свойства продукта. В настоящем обзоре представлен всесторонний критический анализ механизмов действия, эффективности, масштабируемости и рыночного потенциала указанных технологий в сравнении с традиционной термической пастеризацией. Проведен конвергентный анализ, объединяющий возможности оптимизации процессов на базе ИИ и систем прослеживаемости на основе блокчейна в контексте нетермической обработки сырого молока.

Для полноценной реализации потенциала этих технологий будущие исследования должны быть направлены на устранение ряда критических пробелов. Необходима смена парадигмы в пользу интегрированной многоцелевой оптимизации. В рамках этого подхода следует одновременно моделировать сложные компромиссные зависимости между инактивацией патогенов, сохранением биоактивной функциональности и сенсорной целостности продукта в единых условиях обработки. Обязательны комплексные исследования долгосрочной стабильности нутриентов при использовании нетермических методов. Оптимизация

многоступенчатых систем должна быть ориентирована на снижение микробной обсемененности более чем на 6 порядков при обеспечении экономической эффективности производства. Решение проблем масштабируемости требует инновационных инженерных подходов (разработка модульных реакторов), позволяющих снизить капитальные затраты и упростить внедрение технологий на малых предприятиях. Преодоление социально-экономических барьеров невозможно без развития государственно-частного партнерства и проведения широких образовательных кампаний. С точки зрения экологии решающее значение имеет оценка жизненного цикла (LCA) нетермических технологий для количественного подтверждения их преимуществ в области устойчивого развития.

Параллельно должна совершенствоваться нормативно-правовая база для установления стандартизованных протоколов валидации нетермических методов обработки. Разработка инновационных продуктов (например обогащенного пробиотиками сырого молока, прошедшего многоступенчатую обработку) позволит отрасли соответствовать современным трендам здорового питания. Комплексное решение технических, нормативных, социально-экономических и экологических задач позволит нетермическим инновациям обеспечить устойчивое развитие молочной промышленности, гарантируя поставки безопасного, натурального и высококачественного продукта, отвечающего глобальным запросам потребителей.

### Критерии авторства

Авторы в равной степени участвовали в подготовке и написании статьи.

### Contribution

All the authors bear equal responsibility for the content of the 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. Masotti F, Cattaneo S, Stuknytė M, Noni de I. Current insights into non-thermal preservation technologies alternative to conventional high-temperature short-time pasteurization of drinking milk. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2023;63(22):5643–5660. <https://doi.org/10.1080/10408398.2021.2022596>
2. Бурак Л. Ч., Ермошина Т. В., Саманкова Н. В. Устойчивое производство. Концепция качества 4.0. Фундаментальные исследования. 2025. № 9. С. 81–90. [Burak LCh, Ermoshina TV, Samankova NV. Sustainable production. Quality 4.0 concept. *Fundamental Research*. 2025;(9):81–90. (In Russ.)] <https://doi.org/10.17513/fr.43905>
3. Berge AC, Baars T. Raw milk producers with high levels of hygiene and safety. *Epidemiology & Infection*. 2020;148:e14. <https://doi.org/10.1017/S0950268820000060>

4. Sebastianski M, Bridger NA, Featherstone RM, Robinson JL. Disease outbreaks linked to pasteurized and unpasteurized dairy products in Canada and the United States: A systematic review. *Canadian Journal of Public Health*. 2022;113(4):569–578. <https://doi.org/10.17269/s41997-022-00614-y>
5. Koski L, Kisselburgh H, Landsman L, Hulkower R, Howard-Williams M, et al. Foodborne illness outbreaks linked to unpasteurized milk and relationship to changes in state laws – United States, 1998–2018. *Epidemiology & Infection*. 2022;150:e183. <https://doi.org/10.1017/S0950268822001649>
6. Bilung ML, Radzi ES, Tahar AS, Zulkharnain A, Ngui R, et al. BOX-PCR and ERIC-PCR evaluation for genotyping Shiga toxin-producing *Escherichia coli* and *Salmonella enterica* serovar Typhimurium in raw milk. *Foods and Raw Materials*. 2025;13(2):264–275. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2025-2-639>
7. Shrestha S, Basnet HB, Luitel H, Bastola S, Bhattarai RK. Identification, antimicrobial resistance and molecular detection of shiga toxin-producing *E. coli* (STEC) isolated from raw milk of cattle in Chitwan, Nepal. *bioRxiv*. 2024. <https://doi.org/10.1101/2024.01.30.578021>
8. Azizi-Lalabadi M, Moghaddam NR, Jafari SM. Pasteurization in the Food Industry. In: Jafari SM, editor. *Thermal processing of food products by steam and hot water*. Netherlands: Elsevier; 2023. pp. 247–273. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818616-9.00009-2>
9. Бурак Л. Ч. Ограничения и возможности современных технологий в обеспечении микробиологической безопасности пищевых продуктов. Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. 2024. № 2–3. С. 6–13. [Burak LCh. Limitations and opportunities of modern technologies in ensuring microbiological safety of food products. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Food Technology*. 2024;(2–3):6–13. (In Russ.)] <https://doi.org/10.26297/0579-3009.2024.2-3.1>
10. Новокшанова А. Л., Кузин А. А., Медведева Н. А. Производство и качество молока коровьего сырого в Вологодской области. Молочнохозяйственный вестник. 2021. № 4. С. 158–168. [Novokshanova AL, Kuzin AA, Medvedeva NA. Production and quality of raw cow milk in the Vologda region. *Dairy Farming Bulletin*. 2021;(4):158–168. (In Russ.)] [https://doi.org/10.52231/2225-4269\\_2021\\_4\\_158](https://doi.org/10.52231/2225-4269_2021_4_158)
11. Makararpong D, Tantayanon S, Gowanit C, Jareonsawat J, Samnamnim S, et al. Enhancing raw bovine milk quality using ultraviolet-c (UV-C) irradiation: A microbial and lipid peroxidation study. *Food Science of Animal Resources*. 2024;44(2):372–389. <https://doi.org/10.5851/kosfa.2024.e16>
12. Бурак Л. Ч., Сапач А. Н., Саманкова Н. В. Современные методы дезактивации афлатоксинов в пищевых продуктах. Научное обозрение. Биологические науки. 2024. № 4. С. 31–40. [Burak LCh, Sapach AN, Samankova NV. Modern methods of aflatoxin deactivation in food products. *Scientific Review. Biological Sciences*. 2024;(4):31–40. (In Russ.)] <https://doi.org/10.17513/srbs.1383>
13. Yawut N, Mekwilai T, Vichiansan N, Braspaiboon S, Leksakul K, et al. Cold plasma technology: Transforming food processing for safety and sustainability. *Journal of Agriculture and Food Research*. 2024;18:101383. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2024.101383>
14. Бурак Л. Ч., Ермошина Т. В., Саманкова Н. В. Достижение устойчивого развития за счет использования новых технологий переработки пищевых продуктов. Фундаментальные исследования. 2024. № 10. С. 171–179. [Burak LCh, Ermoshina TV, Samankova NV. Achieving sustainable development through the use of new food processing technologies. *Fundamental Research*. 2024;(10):171–179. (In Russ.)] <https://doi.org/10.17513/fr.43705>
15. Michel M, Eldridge AL, Hartmann C, Klassen P, Ingram J, et al. Benefits and challenges of food processing in the context of food systems, value chains and sustainable development goals. *Trends in Food Science & Technology*. 2024;153:104703. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2024.104703>
16. Ozyaybi N. High-pressure processing of milk and dairy products: Latest update. *Processes*. 2024;12(10):2073. <https://doi.org/10.3390/pr12102073>
17. Gbashi S, Njobeh PB. Enhancing food integrity through artificial intelligence and machine learning: A comprehensive review. *Applied Sciences*. 2024;14(8):3421. <https://doi.org/10.3390/app14083421>
18. Kelly AL, Waldron DS, Datta N, O'Shea N. Heat exchangers, pasteurizers and UHT equipment – design and operation. In: Fuquay JW, Fox PF, Roginski H, editors. *Encyclopedia of dairy sciences*. Netherlands: Elsevier; 2022. pp. 321–335. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818766-1.00257-9>
19. Рязанцева К. А., Шерстнева Н. Е. Традиционные и инновационные способы применения ультрафиолетового излучения в молочной промышленности. Техника и технология пищевых производств. 2022. Т. 52. № 2. С. 390–406. [Ryazantseva KA, Sherstneva NE. Traditional and innovative methods of using ultraviolet radiation in the dairy industry. *Food Processing: Techniques and Technology*. 2022;52(2):390–406. (In Russ.)] <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2022-2-2372>
20. Ryser ET. Pasteurization of liquid milk products: Principles, public health aspects. In: McSweeney PLH, McNamara JP, editors. *Encyclopedia of dairy sciences*. Netherlands: Elsevier; 2022. pp. 439–443. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818766-1.00034-9>
21. Бурак Л. Ч. Перспективы использования технологии сверхкритического диоксида углерода в пищевой промышленности. Обзор предметного поля. Ползуновский вестник. 2025. № 1. С. 32–50. [Burak LCh. Prospects for using supercritical carbon dioxidetechnology in food industry. Subject field overview. *Polzunovsky Bulletin*. 2025;(1):32–35. (In Russ.)] <https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2025.01.004>

22. Orlien V, Aalaei K, Poojary MM, Nielsen DS, Ahrné L, *et al.* Effect of processing on *in vitro* digestibility (IVPD) of food proteins. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2023;63(16):2790–2839. <https://doi.org/10.1080/10408398.2021.1980763>
23. Salhi A, Carriere F, Grundy MML, Aloulou A. Enzymes involved in lipid digestion. In: Grundy MML, Wilde PJ, editors. *Bioaccessibility and digestibility of lipids from food*. Cham: Springer International Publishing; 2021. pp. 3–28. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-56909-9\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-030-56909-9_1)
24. Singh P, Pandey VK, Singh R, Negi P, Maurya SN, *et al.* Substantial enhancement of overall efficiency and effectiveness of the pasteurization and packaging process using artificial intelligence in the food industry. *Food and Bioprocess Technology*. 2025;18:1125–1140. <https://doi.org/10.1007/s11947-024-03527-5>
25. Filidou E, Kandilogiannakis L, Shrewsbury A, Kolios G, Kotzampassi K, *et al.* Probiotics: Shaping the gut immunological responses. *World Journal of Gastroenterology*. 2024;30(15):2096–2108. <http://dx.doi.org/10.3748/wjg.v30.i15.2096>
26. Донская Г. А., Креккер Л. Г., Дрожжин В. М., Колосова Е. В. Перекисное окисление липидов и термообработка молока для приготовления кисломолочного продукта смешанного брожения. *Вестник КрасГАУ*. 2022. № 5. С. 226–233. [Donskaya GA, Krekker LG, Drozhzhin VM, Kolosova EV. Lipid peroxidation and heat treatment of milk for the preparation of a fermented milk product of mixed fermentation. *Bulletin of KrasSAU*. 2022;(5):226–233. (In Russ.)] <https://doi.org/10.36718/1819-4036-2022-5-226-233>
27. Mediawathe A, Huppertz T, Chandrapala J, Vasiljevic T. Effect of protein content on heat stability of reconstituted milk protein concentrate under controlled shearing. *Foods*. 2024;13:263. <https://doi.org/10.3390/foods13020263>
28. Rathod NB, Kahar SP, Ranveer RC, Annapure US. Cold plasma an emerging nonthermal technology for milk and milk products: A review. *International Journal of Dairy Technology*. 2021;74(4):615–626. <https://doi.org/10.1111/1471-0307.12771>
29. Mota J, Moura-Alves M, Teixeira AF, Nóbrega R, Lameirão D, *et al.* From cheese whey to functional ingredients: Upcycling whey proteins for cardiovascular and immunomodulatory health – evidence mapping and perspectives from Portugal. *Foods*. 2026;15:908. <https://doi.org/10.3390/foods15050908>
30. Bhujel M, Rai V, Maskey B. Recent developments in non-thermal processing techniques to improve the quality and safety of milk and milk products. *Himalayan Journal of Science and Technology*. 2024;8(1):20–31. <https://doi.org/10.3126/hijost.v8i1.83139>
31. Kim D-K, Kim S-J, Kang D-H. Bactericidal effect of 266 to 279 nm wavelength UVC-LEDs for inactivation of gram positive and Gram negative foodborne pathogenic bacteria and yeasts. *Food Research International*. 2017;97:280–287. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.04.009>
32. Delorme MM, Guimarães JT, Coutinho NM, Balthazar CF, Rocha RS, *et al.* Ultraviolet radiation: An interesting technology to preserve quality and safety of milk and dairy foods. *Trends in Food Science & Technology*. 2020;146–154. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.06.001>
33. Guamán-Lozada DF, Chuquin Vasco D, Parada Rivera M, Pilco Bonilla G. Effect of milk film thickness on the efficiency of UVC radiated sterilization of raw cow's milk. *International Journal of Food Properties*. 2023;26(1):1497–1505. <https://doi.org/10.1080/10942912.2023.2220553>
34. Makararpong D, Tantayanon S, Gowanit CH, Jareonsawat J, Samnamnim S, *et al.* Enhancing raw bovine milk quality using ultraviolet-c (UV-C) irradiation: A microbial and lipid peroxidation study. *Food Science of Animal Resources*. 2024;44(2):372–389. <https://doi.org/10.5851/kosfa.2024.e16>
35. Crook JA, Rossitto PV, Parko J, Koutchma T, Cullor JS. Efficacy of ultraviolet (UV-C) light in a thin-film turbulent flow for the reduction of milkborne pathogens. *Foodborne Pathogens and Disease*. 2015;12(6):506–513. <https://doi.org/10.1089/fpd.2014.1843>
36. Atik A. Non-thermal UV-C processing as an alternative to pasteurisation in fermented dairy beverages: Ayran and kefir. *Fermentation*. 2025;11:557. <https://doi.org/10.3390/fermentation11100557>
37. Coutinho NM, Silveira MR, Pimentel TC, Freitas MQ, Moraes J, *et al.* Chocolate milk drink processed by cold plasma technology: Physical characteristics, thermal behavior and microstructure. *LWT – Food Science and Technology*. 2019;102:324–329. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.12.055>
38. Бурак Л. Ч., Сапач А. Н., Завалей А. П. Влияние обработки холодной плазмой на качество и пищевую ценность растительного сырья. Обзор предметного поля. *Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология*. 2024. Т. 14. № 2. С. 173–183. [Burak LCh, Sapach AN, Zavaley AP. Effect of cold plasma treatment on the quality and nutritional value of plant raw materials. A review of the subject field. *Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2024;14(2):173–183. (In Russ.)] <https://doi.org/10.21285/achb.914>
39. Nikmaram N, Keener KM. The effects of cold plasma technology on physical, nutritional, and sensory properties of milk and milk products. *LWT – Food Science and Technology*. 2022;154:112729. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112729>
40. Abbas HM, Altamim EA, Salama M, Fouad MT, Zahran HA. Cold plasma technology: A sustainable approach to milk preservation by reducing pathogens and enhancing oxidative stability. *Sustainability*. 2024;16:8754. <https://doi.org/10.3390/su16208754>



41. Agriopoulou S, Severoğlu M, Varzakas T, Özer HB. Recent advances in high pressure processing of milk and milk products – a review. *Journal of Agricultural Sciences*. 2023;29(1):1–12. <https://doi.org/10.15832/ankutbd.1150112>
42. Lim SH, Chin NL, Sulaiman A, Tay CH, Wong TH. Microbiological, physicochemical and nutritional properties of fresh cow milk treated with industrial high-pressure processing (HPP) during storage. *Foods*. 2023;12(3):592. <https://doi.org/10.3390/foods12030592>
43. Kateh S, Purnomo EH, Hasanah U. Meta-analysis: Microbial inactivation in milk using high-pressure processing (HPP). *International Journal of Food Science & Technology*. 2024;59(6):4185–4193. <https://doi.org/10.1111/ijfs.16758>
44. Saputra A, Gavahian M, Purnomo EH, Rahayu WP, Utama Z, *et al.* High-pressure processing as an emerging technology for enhancing dairy product safety and quality: A critical review of latest advances, sustainability impact, limitations, and prospects. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2025;65(33):8341–8365. <https://doi.org/10.1080/10408398.2025.2499623>
45. Andrés MT, González-Seisdedos J, Antuña V, Fierro JF. Non-thermal milk decontamination by ionic modulation: A deionization-based alternative to pasteurization. *Foods*. 2026;15:387. <https://doi.org/10.3390/foods15020387>
46. Razali MF, Narayanan S, Md Hazmi NA, Rahim MA, Razi NA, *et al.* Minimal processing for goat milk preservation: Effect of high-pressure processing on its quality. *Journal of Food Processing and Preservation*. 2021;45(7):e15590. <https://doi.org/10.1111/jfpp.15590>
47. Tan SF, Chin NL, Tee TP, Chooi SK. Physico-chemical changes, microbiological properties, and storage shelf life of cow and goat milk from industrial high-pressure processing. *Processes*. 2020;8(6):697. <https://doi.org/10.3390/pr8060697>
48. Cacace F, Bottani E, Rizzi A, Vignali G. Evaluation of the economic and environmental sustainability of high-pressure processing of foods. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 2020;60:102281. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2019.102281>
49. Ahmad T, Butt MZ, Aadil RM, Mehmood T, Nadeem M, *et al.* Impact of nonthermal processing on different milk enzymes. *International Journal of Dairy Technology*. 2019;72(4):481–495. <https://doi.org/10.1111/1471-0307.12622>
50. Rodrigues RM, Avelar Z, Machado L, Pereira RN, Vicente AA. Electric field effects on proteins – novel perspectives on food and potential health implications. *Food Research International*. 2020;137:109709. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109709>
51. Adhipaththu WAMBW, Christopher MS, Marasingha MMT, Thunmuduna TASV, Udayanga MS. The impact of pulsed electric field technology on enzymes, microbial and nutritional quality in milk processing – a comprehensive review. *Journal of Science of the University of Kelaniya*. 2024;17(1):39–50. <https://doi.org/10.4038/josuk.v17i1.8104>
52. Patel A, Koshta V, Prajapati P, Shah N. Approaches for shelf life extension of milk and milk products: At a glance. *Croatian Journal of Food Science and Technology*. 2024;16(1):98–132. <https://doi.org/10.17508/CJFST.2024.16.1.08>
53. Alirezalu K, Munekata PE, Parniakov O, Barba FJ, Lorenzo JM, *et al.* Pulsed electric field and mild heating for milk processing: A review on recent advances. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2020;100(1):16–24. <https://doi.org/10.1002/jsfa.9942>
54. Mohamad A, Shah NNAK, Sulaiman A, Mohd Adzahan N, Aadil RM. Impact of the pulsed electric field on physico-chemical properties, fatty acid profiling, and metal migration of goat milk. *Journal of Food Processing and Preservation*. 2020;44(12):e14940. <https://doi.org/10.1111/jfpp.14940>
55. Siddique F, Imtiaz S, Noreen S, Hussain A, Ishaq H, *et al.* Emerging trends and future perspectives in pulsed electric technology for dairy processing: A comprehensive review. *Discover Food*. 2026;6:51. <https://doi.org/10.1007/s44187-025-00793-w>
56. Carter BG, Cheng N, Kapoor R, Meletharayil GH, Drake MA. Invited review: Microfiltration-derived casein and whey proteins from milk. *Journal of Dairy Science*. 2021;104(3):2465–2479. <http://doi.org/10.3168/jds.2020-18811>
57. Liu Y, Zhang W, Hettinga K, Zhang L, Zhou P. Improving the microbial and nutritional quality of skim milk using microfiltration combined with thermal and nonthermal techniques. *International Dairy Journal*. 2022;134:105466. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2022.105466>
58. Zhang W, Liu Y, Li Z, Chen H, Wang J, *et al.* Effects of microfiltration combined with ultrasonication on shelf life and bioactive protein of skim milk. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2021;77:105668. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2021.105668>
59. Hong R, Xie A, Jiang C, Li B, Wang Y, *et al.* A review of the biological activities of lactoferrin: Mechanisms and potential applications. *Food & Function*. 2024;15:8182–8199. <https://doi.org/10.1039/D4FO02083A>
60. Li Y, Jia H, Zheng Y, Wang X, Chen L, *et al.* The nutritional composition and multi-omics analysis of raw milk from normande and holstein cows. *Food Frontiers*. 2025;6(6):3042–3058. <https://doi.org/10.1002/fft2.70115>
61. Nath K, Dave HK, Patel TM. Revisiting the recent applications of nanofiltration in food processing industries: Progress and prognosis. *Trends in Food Science & Technology*. 2018;73:12–24. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.01.001>
62. Sayel MF, Khalid NT, Rashid KT. A comparative study for soft cheese production by using traditional method and milk concentrated with nanomembrane technique. *Health Biotechnology and Biopharma (HBB)*. 2025;8(4):81–110. <https://doi.org/10.22034/HBB.2025.06>

63. Kumar LH, Sarkar PA. Potential of nanotechnology in dairy processing: A review. In: Goyal MR, editor. Sustainable biological systems for agriculture: Emerging issues in nanotechnology, biofertilizers, wastewater, and farm machines. Waretown: Apple Academic Press; 2018. pp. 55–79. <https://doi.org/10.1201/9781315165264>
64. Nirmal N, Vashisht P, Sharma S, Kumar A, Singh R, *et al.* Enhancement in the active food packaging system through metal-based nanomaterials: A review of innovations, challenges, and future directions. *Discover Food*. 2024;4:108. <https://doi.org/10.1007/s44187-024-00189-2>
65. Brandelli A, Lopes NA, Pinilla CMB. Nanostructured antimicrobials for quality and safety improvement in dairy products. *Foods*. 2023;12:2549. <https://doi.org/10.3390/foods12132549>
66. Пигина С. Ю., Лаптев С. В., Хомочкина С. М. Роботизация и цифровизация процессов в молочном скотоводстве – факторы улучшения качества молока и предотвращения мастита. *Техника и технологии в животноводстве*. 2024. Т. 14. № 4. С. 43–49. [Pigina SYu, Laptev SV, Khomochkina SM. Robotization and digitalization of processes in dairy farming – factors for improving milk quality and preventing mastitis. *Machinery and Technologies in Animal Husbandry*. 2024;14(4):43–49. (In Russ.)] <https://doi.org/10.3390/microorganisms12061051>
67. Гончаров А. В. Современные тенденции автоматизации технологических процессов в пищевой промышленности. *Отходы и ресурсы*. 2025. Т. 12. № S4. [Goncharov AV. Modern trends in automation of technological processes in the food industry. *Waste and Resources*. 2025;12(S4). (In Russ.)] <https://doi.org/10.15862/09FAOR425>
68. Rao VV. Leveraging AI for real-time inventory management in perishable goods supply chains. In: Whig P, Elngar A, editors. *Modernizing the food industry: AI-powered infrastructure, security, and supply chain innovation*. Hershey: IGI Global Scientific Publishing; 2026. pp. 207–232. <https://doi.org/10.4018/979-8-3373-5288-6.ch010>
69. Serrano-Torres GJ, López-Naranjo AL, Larrea-Cuadrado PL, Mazón-Fierro G. Transformation of the dairy supply chain through artificial intelligence: A systematic review. *Sustainability*. 2025;17:982. <https://doi.org/10.3390/su17030982>
70. Бурак Л. Ч., Ермошина Т. В., Родина Е. Е., Баландина С. В. Анализ состояния и тенденции развития концепции качества 4.0 для устойчивого производства продуктов питания. *Международный журнал экспериментального образования*. 2025. № 6. С. 77–90. [Burak LCh, Ermoshina TV, Rodina EE, Balandina SV. Analysis of the state and development trends of the quality 4.0 concept for sustainable food production. *International Journal of Experimental Education*. 2025;(6):77–90. (In Russ.)] <https://doi.org/10.17513/mjeo.12231>
71. Гусаров И. В., Обряева О. Д. Качество сырого молока: опыт высокотехнологичного производства в Вологодской области. *Сыроделие и маслоделие*. 2025. № 4. С. 5–10. [Gusarov IV, Obyraeva OD. Quality of raw milk: Experience of high-tech production in the Vologda region. *Cheese- and Butter Making*. 2025;(4):5–10. (In Russ.)] <https://doi.org/10.21603/2073-4018-2025-4-36>
72. Kumari S, Venkatesh VG, Shi Y. Agriculture supply chain risks in emerging economies: Antecedents of risk prioritization model. *Business Strategy and the Environment*. 2026;1–21. <https://doi.org/10.1002/bse.70697>
73. Kirubakaran D, Meer MS, Jayakodi S, Kumar R, Singh P, *et al.* Smart technologies enhance detection, monitoring, and traceability in global food safety. *Discover Food*. 2026;6:41. <https://doi.org/10.1007/s44187-025-00716-9>
74. Nwariaku H, Fadojutimi B, Lawson LGL, Adebayo A, Ogunleye T, *et al.* Blockchain technology as an enabler of transparency and efficiency in sustainable supply chains. *International Journal of Science and Research Archive*. 2024;12(2):1779–1789. <https://doi.org/10.30574/ijrsra.2024.12.2.1454>
75. Stanescu S-G, Ionescu CA, Ștefan MC, Ionescu L, Bondac G-T, *et al.* Digitalization and blockchain integration in agri-food supply chains: Towards a resilient, circular, and sustainable future. *Sustainability*. 2025;17:9276. <https://doi.org/10.3390/su17209276>
76. Akhigbe BI, Munir K, Akinade O, Akanbi L, Oyedele LO. IoT technologies for livestock management: A review of present status, opportunities, and future trends. *Big Data and Cognitive Computing*. 2021;5:10. <https://doi.org/10.3390/bdcc5010010>
77. Sawale P, Patil P, Singh A, Xavier J, Kumar P, *et al.* Non-thermal techniques for microbiological safety, nutritional preservation, and enhanced efficiency in dairy processing. *Functional Food Science*. 2024;4(5):180–203. <https://doi.org/10.31989/ffs.v4i5.1326>
78. Pasik K, Arkusz K, Klekiel T, Woźniak W, Stryjski R. Evaluating the effectiveness of ultraviolet-C lamps for reducing *Escherichia coli*: Distance and exposure time. In: Gzik M, Paszenda Z, Piętko E, Tkacz E, Milewski K, Jurkoć J, editors. *Innovations in biomedical engineering 2023*. Cham: Springer; 2024. pp. 215–224. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-52382-3\\_24](https://doi.org/10.1007/978-3-031-52382-3_24)
79. Liang N, Mohamed HM, Kim BJ, Lee S, Park J, *et al.* High-pressure processing of human milk: A balance between microbial inactivation and bioactive protein preservation. *The Journal of Nutrition*. 2023;153(9):2598–2611. <https://doi.org/10.1016/j.tjnut.2023.07.001>
80. Chetia J, Panda TC, Kumari S, Seth D. Effect of non-thermal processing on nutritional and functional properties of milk and milk products – a review. *Indian Journal of Animal Health*. 2023;62(2):32–48. <https://doi.org/10.36062/ijah.2023.spl.03323>

81. Hassoun A, Garcia-Garcia G, Trollman H, Jagtap S, Parra-López C, *et al.* Birth of dairy 4.0: Opportunities and challenges in adoption of fourth industrial revolution technologies in the production of milk and its derivatives. *Current Research in Food Science*. 2023;7:100535. <https://doi.org/10.1016/j.crfs.2023.100535>
82. Yang P, Rao L, Zhao L, Wu X, Wang Y, *et al.* High pressure processing combined with selected hurdles: Enhancement in the inactivation of vegetative microorganisms. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 2021;20(2):1800–1828. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12724>
83. Liu Y, Shuang J, Hettinga K, Zhang L, Liu X, *et al.* Quality attributes of whole milk powder processed using ultrasonication and UV-C radiation compared with equivalent thermal treatment. *International Dairy Journal*. 2024;155:105954. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2024.105954>
84. Chakraborty P, Mukherjee A, Kumar S. Laws and regulations for emerging food-processing technologies. In: Kumar S, Mukherjee A, Mitra A, Halder D, editors. *Emerging technologies in food preservation*. Boca Raton: CRC Press; 2023. pp. 377–387. <https://doi.org/10.1201/9781003147978>
85. Souroullas K, Papademas P. Challenges in developing a process analytical technology (PAT)-based verification of UV-C treatment of milk. *International Journal of Dairy Technology*. 2025;78(1):e13168. <https://doi.org/10.1111/1471-0307.13168>
86. Song X, Pendenza P, Díaz Navarro M, Valderrama García E, Di Monaco R, *et al.* European consumers perceptions and attitudes towards non-thermally processed fruit and vegetable products. *Foods*. 2020;9(12):1732. <https://doi.org/10.3390/foods9121732>
87. Malik M, Gahlawat VK, Mor RS, Singh MK. Unlocking dairy traceability: Current trends, applications, and future opportunities. *Future Foods*. 2024;10:100426. <https://doi.org/10.1016/j.fufo.2024.100426>
88. Čapla J, Zajác P, Ševcová K, Čurlej J, Fikselová M. Milk and dairy products – summary of european legislation, hygiene manuals, ISO standards and codex alimentarius standards. *Slovak Journal of Food Sciences*. 2022;16:431–462. <https://doi.org/10.5219/legestic.1>
89. Разумовская В. В., Лунева Н. А. Контроль безопасности молока-сырья в соответствии с актуальной нормативной документацией. *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*. 2023. № 5. С. 271–275. [Razumovskaya VV, Luneva NA. Safety control of raw milk in accordance with current regulatory documentation. *Proceedings of the Orenburg State Agrarian University*. 2023;(5):271–275. (In Russ.)] <https://doi.org/10.37670/2073-0853-2023-103-5-271-275>

#### **Дополнительная информация об авторах / Additional information about the authors**

Бурак Леонид Чеславович / Leonid Ch. Burak ORCID 0000-0002-6613-439X; eLIBRARY SPIN 3898-5389  
Лукин Александр Анатольевич / Aleksandr A. Lukin ORCID 0000-0003-4753-3210; eLIBRARY SPIN 2692-9210  
Гриценко Александр Владимирович / Alexander V. Gritsenko ORCID 0000-0002-7652-7912; eLIBRARY SPIN 3252-3803  
Тимошук Ирина Вадимовна / Irina V. Timoshchuk ORCID 0000-0002-1349-2812; eLIBRARY SPIN 1172-6298  
Горелкина Алена Константиновна / Alena K. Gorelkina ORCID 0000-0002-3782-2521; eLIBRARY SPIN 9970-1320

<https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-3-2651>  
<https://elibrary.ru/TEEUTB>

Оригинальная статья  
<https://fptt.ru>

## Сравнительная оценка действия цитокининов на морфогенез и накопление фенольных соединений у *Hyssopus officinalis* в культуре *in vitro*



Е. А. Попова\*, О. В. Кригер

Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград, Россия

Поступила в редакцию: 28.04.2026

Принята после рецензирования: 30.05.2026

Принята к публикации: 07.07.2026

\*e-mail: [elena\\_popova97@mail.ru](mailto:elena_popova97@mail.ru)

© Е. А. Попова, О. В. Кригер, 2026



### Аннотация.

*Hyssopus officinalis* L. – эфиромасличная культура семейства *Lamiaceae* (Яснотковые), которая ценится за фенольные соединения, флавоноиды и гидроксикоричные кислоты, обуславливающие ее фармакологический потенциал. Применение биотехнологических методов *in vitro* открывает возможность направленно влиять на морфогенез и синтез вторичных метаболитов путем добавления регуляторов роста в питательную среду, что делает актуальным поиск их оптимальных концентраций. Цель исследования – изучить влияние регуляторов роста цитокининового типа на микроразмножение и содержание биологически активных веществ у *H. officinalis* в условиях *in vitro*.

Объектом исследования служили микрорастения *in vitro* *H. officinalis* сорта Лекарь. Стерилизацию семян проводили с применением четырех дезинфицирующих агентов ( $H_2O_2$ ,  $AgNO_3$ ,  $NaClO$  и  $H_2SO_4$ ), после чего семена высевали на среду Мурасиге-Скуга без регуляторов роста. Проростки культивировали на среде, дополненной различными концентрациями цитокининов (6-бензиламинопурина, кинетина, тидиазурина и 6-( $\gamma$ , $\gamma$ -диметилаллиламино)пурина), при 16-часовом фото-периоде и температуре  $25 \pm 1$  °C в течение 30 суток. В полученных экстрактах микрорастений спектрофотометрически определяли суммарное содержание фенольных соединений, флавоноидов, гидроксикоричных кислот и антиоксидантную активность. Статистическую обработку данных выполняли с использованием однофакторного дисперсионного анализа и иерархического кластерного анализа.

Установлено, что обработка семян *H. officinalis* концентрированной серной кислотой обеспечила 98 % стерильности и 99 % всхожести, что превосходит ранее опубликованные данные. Среди регуляторов роста наиболее эффективным для морфогенеза оказался 6-бензиламинопурин в концентрации 0,1 мг/л, обеспечивший максимальную длину побегов (4,6 см), их количество (3,2 шт.) и число узлов (9,6 шт.). Кластерный анализ подтвердил, что оптимальными для развития микрорастений являются концентрации 0,1 мг/л 6-бензиламинопурина, 1,0 мг/л кинетина и 0,1 мг/л тидиазурина. При оценке биологической активности 6-бензиламинопурин (0,1 мг/л) максимально увеличивал содержание фенольных соединений (в 5 раз), гидроксикоричных кислот (в 5 раз) и антиоксидантную активность, тогда как тидиазурон (0,1 мг/л) селективно стимулировал накопление флавоноидов.

Разработанные для *H. officinalis* подходы к стерилизации семян и подбору регуляторов роста для микроразмножения обеспечивают получение растительного сырья с заданным биохимическим профилем.

**Ключевые слова.** *Hyssopus officinalis*, микроразмножение *in vitro*, регуляторы роста, фенольные соединения, флавоноиды, гидроксикоричные кислоты, антиоксидантная активность

**Для цитирования:** Попова Е. А., Кригер О. В. Сравнительная оценка действия цитокининов на морфогенез и накопление фенольных соединений у *Hyssopus officinalis* в культуре *in vitro*. Техника и технология пищевых производств. 2026. Т. 56. № 3. С. 481–491. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-3-2651>



# Effect of Cytokinins on Morphogenesis and Accumulation of Phenolic Compounds in *Hyssopus officinalis*: A Comparative Study *in vitro*



Elena A. Popova\*, Olga V. Kriger

Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia

Received: 28.04.2026  
 Revised: 30.05.2026  
 Accepted: 07.07.2026

\*e-mail: [elena\\_popova97@mail.ru](mailto:elena_popova97@mail.ru)  
 © E.A. Popova, O.V. Kriger, 2026



## Abstract.

*Hyssopus officinalis* L. is a valuable essential oil plant of the *Lamiaceae* family, which owes its pharmacological properties to phenolic compounds, flavonoids, and hydroxycinnamic acids. Cultivation *in vitro* makes it possible to control morphogenesis and the accumulation of secondary metabolites by adding growth regulators to the nutrient medium. Since this requires knowledge of optimal concentrations, the aim of this *in vitro* study was to investigate the effect of cytokinin-type growth regulators on the micropropagation and content of bioactive substances in *H. officinalis*.

The research featured *in vitro* microplants of *H. officinalis* (cv. Lekar). The seeds were sterilized using H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, AgNO<sub>3</sub>, NaClO, and H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> as disinfectants. They were then sown on a Murashige and Skoog medium without growth regulators. The resulting seedlings were cultured on a medium supplemented with different concentrations of cytokinins (6-benzylaminopurine, kinetin, thidiazuron, and 6-(γ,γ-dimethylallylamino)purine). The experiment lasted for 30 days under a 16/8-h light/dark regimen at 25 ± 1°C. The obtained microplant extracts underwent spectrophotometry to determine the total contents of phenolic compounds, flavonoids, hydroxycinnamic acids, and antioxidant activity. Statistical data processing was performed using a one-way analysis of variance and hierarchical cluster analysis.

The treatment of *H. officinalis* seeds with concentrated sulfuric acid resulted in 98% sterility and 99% germination, exceeding previously published data. Among the growth regulators, 6-benzylaminopurine at 0.1 mg/L was found to be the most effective for morphogenesis, resulting in the highest shoot length (4.6 cm), shoot number (3.2), and node number (9.6). Cluster analysis confirmed that concentrations of 0.1 mg/L 6-benzylaminopurine, 1.0 mg/L kinetin, and 0.1 mg/L thidiazuron were optimal for microplant development. In terms of bioactivity, 6-benzylaminopurine (0.1 mg/L) maximally increased the content of phenolic compounds (5-fold), hydroxycinnamic acids (5-fold), and antioxidant activity, while thidiazuron (0.1 mg/L) selectively stimulated flavonoid accumulation.

The novel methods of seed sterilization combined with specific growth regulators for *H. officinalis* ensured the production of plant material with a targeted biochemical profile.

**Keywords.** *Hyssopus officinalis*, micropropagation *in vitro*, growth regulators, phenolic compounds, flavonoids, hydroxycinnamic acids, antioxidant activity

**For citation:** Popova EA, Kriger OV. Effect of Cytokinins on Morphogenesis and Accumulation of Phenolic Compounds in *Hyssopus officinalis*: A Comparative Study *in vitro*. Food Processing: Techniques and Technology. 2026;56(3):481–491. (In Russ.) <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-3-2651>

## Введение

В настоящее время наблюдается устойчивый рост глобальной тенденции к фитотерапии, которая является неотъемлемой частью традиционной медицины как в России, так и в других странах мира [1]. Согласно данным Всемирной организации здравоохранения, примерно 80 % населения в развивающихся странах используют традиционные средства природного происхождения для лечения и профилактики заболеваний [2].

Многие растения обладают антиоксидантным, антибактериальным, противовирусным, спазмолитическим, противовоспалительным и цитотоксическим действием, что делает их перспективными источниками ценных

биологически активных веществ [3–8]. Возрастающий интерес к лекарственным растениям стимулирует разработку биотехнологических методов их сохранения и рационального использования.

Семейство Яснотковые (*Lamiaceae*) объединяет более 230 родов и около 7000 видов ароматических растений, многие из которых принадлежат к лекарственным [3, 5, 8–10]. *Hyssopus officinalis* L. – типичный представитель данного семейства, традиционно используемый в фитотерапии [3]. Наличие комплекса биологически активных соединений в различных органах *H. officinalis* обуславливает его выраженные фармакологические свойства. Фитохимические компоненты

растения, включая фенольные соединения, флавоноиды, полисахариды и дубильные вещества, обеспечивают широкий спектр терапевтических эффектов: антиоксидантные, противосудорожные, противогрибковые, противомикробные, антигемолитические, противовоспалительные и спазмолитические свойства [3, 8, 10–12].

Особый интерес представляют фенольные соединения и флавоноиды, которые не только определяют адаптационный потенциал растения, но и служат маркерами качества при производстве фитопрепаратов [13, 14]. Гидроксикоричные кислоты вносят основной вклад в антиоксидантную активность экстрактов *H. officinalis* [3]. Накопление этих метаболитов существенно варьируется в зависимости от условий выращивания, что создает трудности при стандартизации сырья, полученного из природных популяций или в результате традиционного культивирования [12].

Использование традиционного лекарственного растительного сырья сопряжено с рядом ограничений: истощение природных популяций ценных видов, риск их исчезновения, а также зависимость от сезона сбора, географического местопрорастания и вариабельности химического состава сырья [15]. Кроме того, заготовка дикорастущих растений не всегда позволяет получить материал с воспроизводимым содержанием целевых соединений, что является критичным для фармацевтической промышленности.

Традиционные методы размножения *H. officinalis* (семенной и черенкование) часто сопряжены с низкой всхожестью семян, медленным ростом и риском передачи патогенов. В связи с этим методы микроклонального размножения *in vitro* представляют собой перспективную альтернативу, позволяющую получать генетически однородный посадочный материал с высоким коэффициентом размножения и воздействовать на метаболизм растений через модификацию питательной среды [16]. Микроразмножение *in vitro* выступает в качестве перспективного биотехнологического инструмента, который позволяет получать целевые лекарственные соединения, а также обеспечивать устойчивое сохранение и рациональное использование биоразнообразия [16].

Добавление в питательную среду регуляторов роста не только позволяет контролировать процессы морфогенеза в растениях, но и оказывать влияние на накопление вторичных метаболитов [17]. Цитокинины – один из ключевых классов фитогормонов, участвующих в регуляции деления клеток, дифференцировки побегов и синтеза фенольных соединений. Разные представители цитокининов обладают различной активностью и могут неодинаково влиять на метаболизм растений в культуре *in vitro* [17]. Механизмы их действия включают активацию транскрипционных факторов, регуляцию экспрессии генов биосинтеза фенилпропаноидов, а также модуляцию гормонального баланса.

Подтверждением этого служат исследования, проведенные на близкородственных видах, таких как *Melissa*

и *Lallemantia* [18, 19]. Например, в исследовании влияния регуляторов роста растений на микроразмножение *in vitro* и метаболические профили *Melissa officinalis* L. показано, что растения, выращенные на среде Мурасиге-Скуга, обогащенной 1,0 мг/л 6-бензиламинопурина (БАП) и 0,1 мг/л индолилуксусной кислоты (ИУК), продемонстрировали максимальное содержание общих фенолов [20].

Для *H. officinalis* выявлено, что БАП эффективно индуцирует образование побегов [21–23]. В литературе представлено сравнительное изучение трех цитокининов (БАП, кинетин (КИН), тидиазурина (ТДЗ)) в концентрации 1 мг/л: максимальное содержание фенольных соединений и флавоноидов достигалось при добавлении ТДЗ [15]. Имеются данные о влиянии минерального состава и аэрации на накопление флавоноидов у *H. officinalis* сорта Лекарь [25], а также о действии БАП на рост сорта Иней [26]. Однако комплексное влияние широкого диапазона концентраций четырех цитокининов (БАП, КИН, ТДЗ и 6-( $\gamma,\gamma$ -диметилаллил)амино)пурина (2iP)) на морфогенетические параметры и накопление фенольных соединений, флавоноидов, гидроксикоричных кислот и антиоксидантную активность у *H. officinalis* ранее не изучалось. Особый интерес представляет цитокинин 2iP, который широко используется в культуре *in vitro* многих растений, но его действие на *H. officinalis* до сих пор не исследовано.

Цель исследования – изучить влияние регуляторов роста цитокининового типа на микроразмножение и содержание биологически активных веществ у *H. officinalis* в условиях *in vitro*.

### Объекты и методы исследования

Объектами исследования являлись микрорастения *in vitro* *Hyssopus officinalis* L. сорта Лекарь, полученные из семян фирмы «Гавриш» (Россия). Подготовка семян *H. officinalis* для стерилизации включала их очистку мыльным раствором с последующей промывкой проточной и дистиллированной водой. На первом этапе три группы семян погружали на 1 мин в 70 % раствор этанола ( $C_2H_5OH$ ). Далее семена дезинфицировали с использованием  $H_2O_2$ ,  $AgNO_3$  и  $NaClO$  в течение 15 мин. Четвертую группу семян сначала помещали в 1 мл концентрированной  $H_2SO_4$  на 1 мин, промывали водопроводной и дистиллированной водой, после чего в течение 1 мин выдерживали в 70 % растворе  $C_2H_5OH$ . Затем семена дополнительно дезинфицировали  $NaClO$  в течение 15 мин. Завершающим этапом проводили пятикратную промывку стерильной дистиллированной водой. Для каждого стерилизующего агента отбирали по 140 семян. После стерилизации семена высевали на агаризованную (7 г/л) среду Мурасиге-Скуга (МС) [27] без регуляторов роста и инкубировали в чашках Петри в течение 14 суток.

Полученные проростки переносили в колбы со средой МС, дополненной различными концентрациями 6-бензиламинопурина (БАП), кинетина (КИН), тиди-

азурона (ТДЗ) и 6-( $\gamma,\gamma$ -диметилаллиламино)пурина (2iP) (табл. 1). Культивирование выполняли при 16-часовом фотопериоде и температуре  $25 \pm 1$  °C в течение 30 суток. По окончании этого периода оценивали длину побегов, а также число узлов, побегов и корней. Высушенные в лиофильной сушилке Triad (Labconco, США) образцы растений упаковывали и хранили при температуре –18 °C.

Фенольные соединения экстрагировали 70 % раствором этанола из измельченных сухих микрорастений *H. officinalis* в соответствии с методикой [28].

Количественную оценку биологически активных веществ в экстрактах микрорастений *H. officinalis* проводили спектрофотометрическим методом на приборе UV-3600 (Shimadzu, Япония). Все измерения осуществляли в трехкратной повторности.

Суммарное содержание фенольных соединений определяли с помощью реактива Фолина-Чокальтеу при длине волны 765 нм, используя калибровочную кривую по галловой кислоте [29]. Результаты выражали в миллиграммах-эквивалента галловой кислоты на грамм сухой массы (мг-экв. ГК/г СМ).

Суммарное содержание флавоноидов оценивали по комплексообразованию с хлоридом алюминия ( $AlCl_3$ ) при 415 нм, полученные данные пересчитывали на эквивалент рутина [30]. Результаты выражали в миллиграммах-эквивалента рутина на грамм сухой массы (мг-экв. рутина/г СМ).

Суммарное содержание гидроксикоричных кислот определяли по реакции с реактивом Арно, измеряя оптическую плотность при 510 нм, с калибровкой по розмариновой кислоте [31]. Результаты выражали в миллиграммах-эквивалента розмариновой кислоты на грамм сухой массы (мг-экв. РК/г СМ).

Антиоксидантную активность выявляли по ингибированию радикала DPPH (2,2-дифенил-1-пикрилгидразил) при 515 нм [32]. Результаты выражали в миллиграммах-эквивалента аскорбиновой кислоты на грамм сухой массы (мг-экв. АК/г СМ).

Экспериментальные данные обрабатывали с использованием пакетов IBM SPSS Statistics 23 (IBM Corpora-

tion, США) и OriginPro 2021 (OriginLab Corporation, США). Для выявления статистически значимых различий использовали однофакторный дисперсионный анализ (ANOVA) с последующим апостериорным критерием Тьюки ( $p \leq 0,05$ ), а также иерархический кластерный анализ методом Варда.

### Результаты и их обсуждение

Первым этапом проводили стерилизацию семян *Hyssopus officinalis* L. с применением четырех дезинфицирующих средств: 3 % пероксида водорода, 10 % нитрата серебра, концентрированной серной кислоты и 20 % гипохлорита натрия. Для каждого химического вещества использовали по 140 семян. Семена инкубировали на среде Мурасиге-Скуга (МС) без добавления регуляторов роста в течение двух недель, далее проводили оценку эффективности методов стерилизации.

По результатам оценки наиболее эффективным оказался метод стерилизации концентрированной серной кислотой, обеспечивший 137 стерильных и 138 проросших семян, тогда как применение нитрата серебра привело к инфицированию 137 семян из 140 (рис. 1). Обработка серной кислотой способствует размягчению плотной семенной оболочки, характерной для многих видов семейства *Lamiaceae*, и обеспечивает более глубокое проникновение стерилизующего агента (гипохлорита натрия) во внутренние ткани семени.

Ранее для стерилизации семян *H. officinalis* использовали комбинацию 70 % этанола (30 с) и 10 % гипохлорита натрия (10 мин) [8, 21]. В данном эксперименте добавление этапа обработки концентрированной серной кислотой позволило достичь 98 % стерильности и 99 % всхожести, что превосходит результаты, приведенные в указанных работах (рис. 1).

Таким образом, предложенный протокол стерилизации является высокоэффективным и может быть рекомендован для введения в культуру *in vitro* семян *H. officinalis*, а также, возможно, других видов с плотной семенной кожурой.

Подбор регуляторов роста для размножения микрорастений *in vitro* *H. officinalis* выполняли с использо-

Таблица 1. Концентрация регуляторов роста для микроразмножения *Hyssopus officinalis* L.

Table 1. Concentrations of growth regulators for *Hyssopus officinalis* L. micropropagation

| Концентрация регулятора роста в 1 л среды, мг/л |                                               |            |         |                    |
|-------------------------------------------------|-----------------------------------------------|------------|---------|--------------------|
| Контроль                                        | 6-( $\gamma,\gamma$ -диметилаллил-амино)пурин | Тидиазурон | Кинетин | 6-бензиламинопурин |
| 0                                               | 0,50                                          | 0,10       | 0,10    | 0,10               |
| 0                                               | 1,00                                          | 0,25       | 0,25    | 0,25               |
| 0                                               | 2,50                                          | 0,50       | 0,50    | 0,50               |
| 0                                               | 5,00                                          | 1,00       | 1,00    | 1,00               |
| 0                                               | 7,50                                          | 1,50       | 1,50    | 1,50               |
| 0                                               | 10,00                                         | 2,00       | 2,00    | 2,00               |
| 0                                               | 15,00                                         | 3,00       | 3,00    | 3,00               |

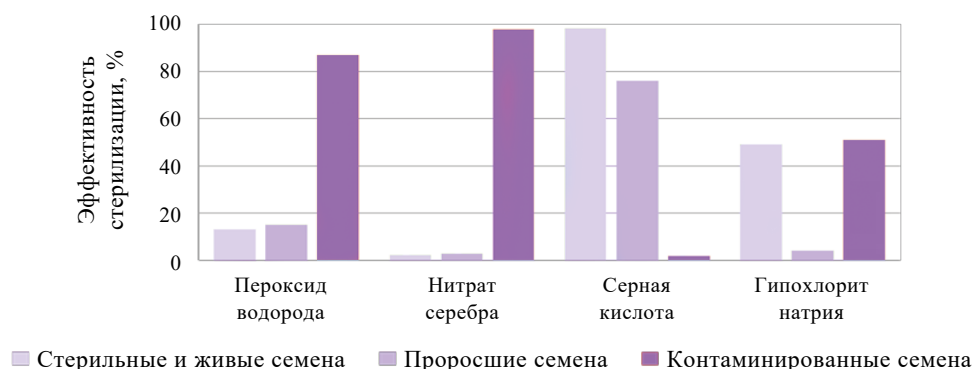


Рисунок 1. Оценка эффективности различных способов стерилизации семян *Hyssopus officinalis* L.

Figure 1. Effect of various sterilization methods on *Hyssopus officinalis* L. seeds

ванием стерильных двухнедельных проростков. Регуляторы роста добавляли в питательную среду МС в различных концентрациях (табл. 1), в качестве контроля применяли среду МС без добавления регуляторов роста.

Каллусообразование отмечалось при добавлении 6-бензиламинопурина (БАП) в концентрациях 0,25; 0,50 и 1,00 мг/л; кинетина (КИН) – 0,25; 0,50 и 1,50 мг/л; тидиазурина (ТДЗ) – 2,0 и 3,0 мг/л, а также при всех концентрациях 6-( $\gamma$ , $\gamma$ -диметилаллиламино)пурина (2iP). Ризогенез наблюдался только на среде с добавлением 1 мг/л КИН. Однако в других работах продемонстрировано [21, 22], что для индукции корнеобразования применяются ауксины, такие как индолилмасляная кислота и индолилуксусная кислота. Отсутствие массового корнеобразования на средах с цитокининами ожидаемо, т. к. цитокинины в высоких концентрациях подавляют ризогенез.

КИН в данном исследовании проявил себя как стимулятор ризогенеза и образования узлов при концентрации 1 мг/л, что не было отмечено в других исследованиях [21, 22]. Вероятно, этот эффект является сортоспецифичным и требует дальнейшего изучения.

Максимальное увеличение длины побегов зафиксировано при внесении БАП в дозе 0,1 мг/л ( $4,6 \pm 0,2$  см), а также КИН в концентрациях 0,5 и 1,0 мг/л ( $4,5 \pm 0,4$  и  $4,2 \pm 0,5$  см соответственно) (рис. 2). На среде с ТДЗ в концентрации 0,5 мг/л прирост побегов составлял  $3,2 \pm 0,3$  см, что было наибольшим показателем и статистически не отличалось от контрольной группы ( $3,7 \pm 0,3$  см). Однако концентрации 2iP приводила к снижению прироста длины побегов.

Наибольшее количество побегов наблюдалось при добавлении 0,1 мг/л БАП ( $3,2 \pm 0,4$  шт.) и ТДЗ ( $2,1 \pm 0,5$  шт.), а также при добавлении 1,0 мг/л КИН ( $2,5 \pm 0,6$  шт.) (рис. 3). В присутствии различных концентраций 2iP не установлено значимых различий в количестве побегов (ANOVA,  $F = 4,4$ ;  $p = 0,005$ ).

Результаты анализа количества узлов *H. officinalis* на среде с добавлением разных концентраций регуляторов роста представлены на рисунке 4. Наибольшее количество узлов отмечено при добавлении 0,5 мг/л БАП

( $9,6 \pm 0,5$  шт.), 1,0 мг/л КИН ( $7,6 \pm 0,9$  шт.), 0,1 мг/л ТДЗ ( $6,6 \pm 2,2$  шт.) и 2,5 мг/л 2iP ( $9,5 \pm 1,3$  шт.).

Цитокинины играют ключевую роль в регуляции побегообразования у *H. officinalis* в культуре *in vitro*. Наиболее эффективным для увеличения длины побегов и их количества оказался БАП в низкой концентрации (0,1 мг/л). Это согласуется с более ранними данными о том, что БАП успешно индуцирует образование побегов у иссопа [21–23]. Однако в упомянутых работах оптимальные концентрации БАП составляли 1–2 мг/л, тогда как в данном эксперименте максимальный эффект достигнут при более низкой концентрации. Такое отличие может быть обусловлено использованием разных сортов, а также различиями в условиях культивирования и продолжительностью эксперимента.

На дендрограмме, представленной в верхней части рисунка 5, можно выделить два кластера морфометрических параметров. В первый кластер входят длина проростков и количество узлов, во второй кластер – количество побегов. Дендрограмма, расположенная слева, в свою очередь, делит исследуемые концентрации цитокининов на два основных кластера. Наиболее эффективные концентрации регуляторов роста (0,1 мг/л ТДЗ; 1,0 мг/л КИН и 0,1 мг/л БАП) входят в первый кластер, во второй кластер – все остальные. Кластерный анализ объективно подтверждает, что именно эти три варианта концентраций цитокининов в питательной среде обеспечивают наилучшее развитие микрорастений по комплексу морфометрических показателей.

Полученные результаты об ингибирующем эффекте 2iP согласуются с литературными данными [10]. В указанном исследовании аналогичные эффекты наблюдались у других растений. Следует подчеркнуть, что этот факт подтверждает необходимость тщательного подбора регуляторов роста для растений *in vitro*.

Активный рост микрорастений *H. officinalis in vitro* обеспечивали три варианта питательной среды МС с добавлением 0,1 мг/л БАП, 1,0 мг/л КИН или 0,1 мг/л ТДЗ. Микрорастения, полученные на данных средах,



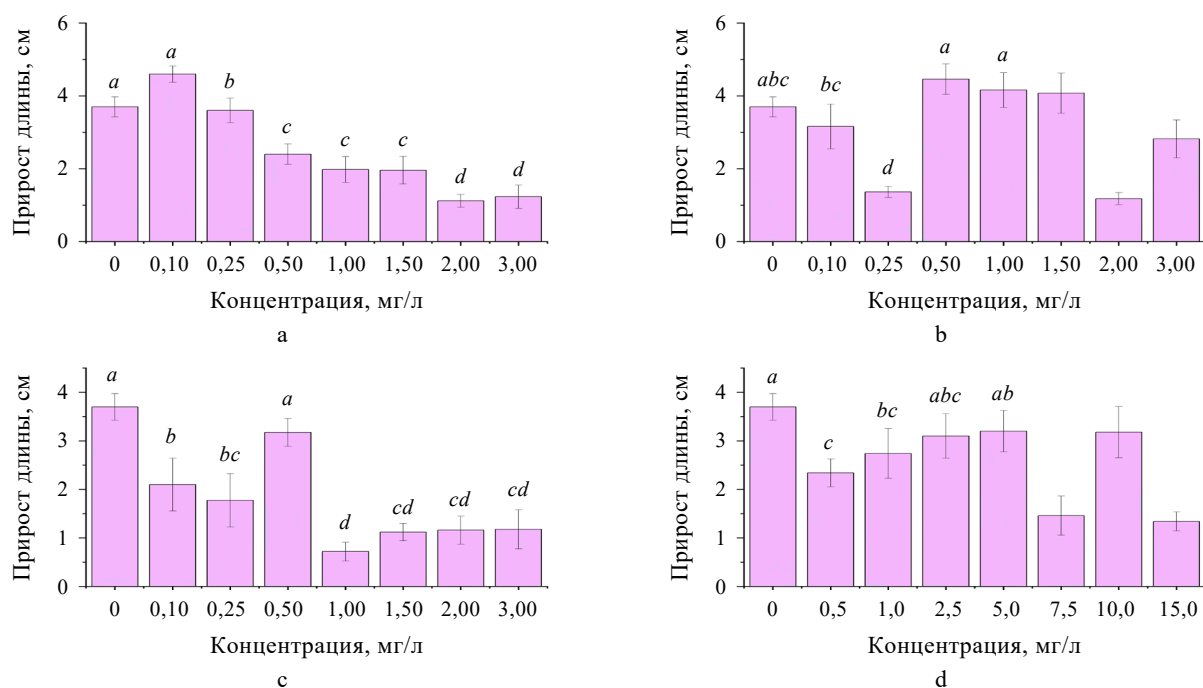


Рисунок 2. Влияние концентраций цитокининов на прирост длины побегов микрорастений *Hyssopus officinalis* L. *in vitro*: а – 6-бензиламинопурин; б – кинетин; с – тидиазурон; d – 6-(γ,γ-диметилаллиламино)пурин. Статистически значимые различия отмечены разными буквами (ANOVA, тест Тьюки (HSD),  $p \leq 0,05$ )

Figure 2. Effect of cytokinin concentrations *in vitro* on the growth of shoots of *Hyssopus officinalis* L. microplants: а – 6-benzylaminopurine; б – kinetin; с – thidiazuron; and d – 6-(γ,γ-dimethylallylamino)purine. Statistically significant differences are marked with different letters (ANOVA, Tukey test (HSD),  $p < 0.05$ )

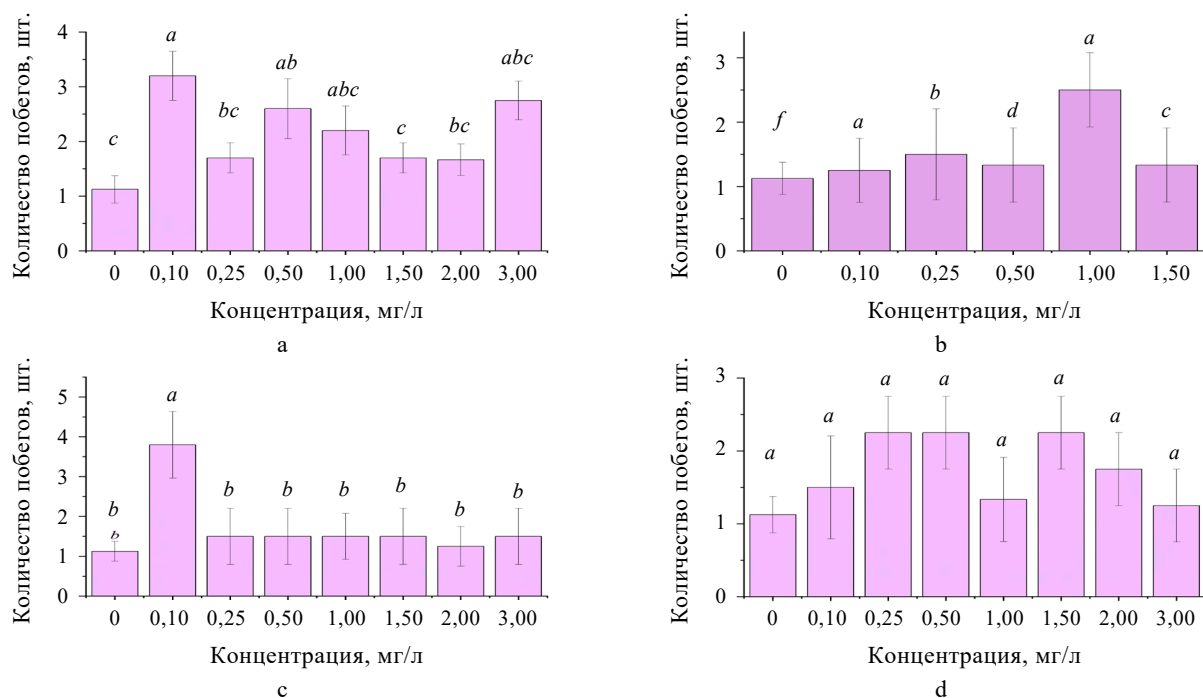


Рисунок 3. Влияние концентраций цитокининов на количество побегов микрорастений *Hyssopus officinalis* L. *in vitro*: а – 6-бензиламинопурин; б – кинетин; с – тидиазурон; d – 6-(γ,γ-диметилаллиламино)пурин. Статистически значимые различия отмечены разными буквами (ANOVA, тест Тьюки (HSD),  $p \leq 0,05$ )

Figure 3. Effect of cytokinin concentrations *in vitro* on the number of shoots of *Hyssopus officinalis* L. microplants: а – 6-benzylaminopurine; б – kinetin; с – thidiazuron; and d – 6-(γ,γ-dimethylallylamino)purine. Statistically significant differences are marked with different letters (ANOVA, Tukey test (HSD),  $p < 0.05$ )

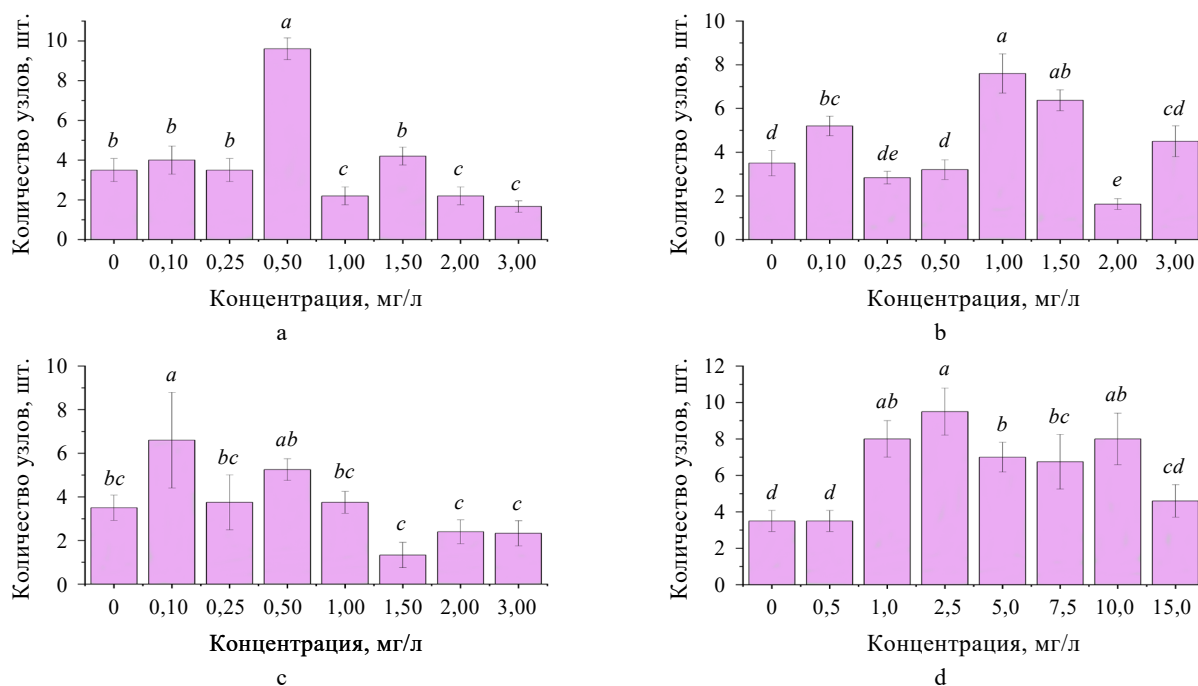


Рисунок 4. Влияние концентраций цитокининов на количество узлов микрорастений *Hyssopus officinalis* L. *in vitro*: а – 6-бензиламинопурин; б – кинетин; с – тидиазурон; д – 6-(γ,γ-диметилаллиламино)пурин. Статистически значимые различия отмечены разными буквами (ANOVA, тест Тьюки (HSD),  $p \leq 0,05$ )

Figure 4. Effect of cytokinin concentrations *in vitro* on the number of nodes of *Hyssopus officinalis* L. microplants: а – 6-benzylaminopurine; б – kinetin; с – thidiazuron; and д – 6-(γ,γ-dimethylallylamino)purine. Statistically significant differences are marked with different letters (ANOVA, Tukey test (HSD),  $p < 0.05$ )

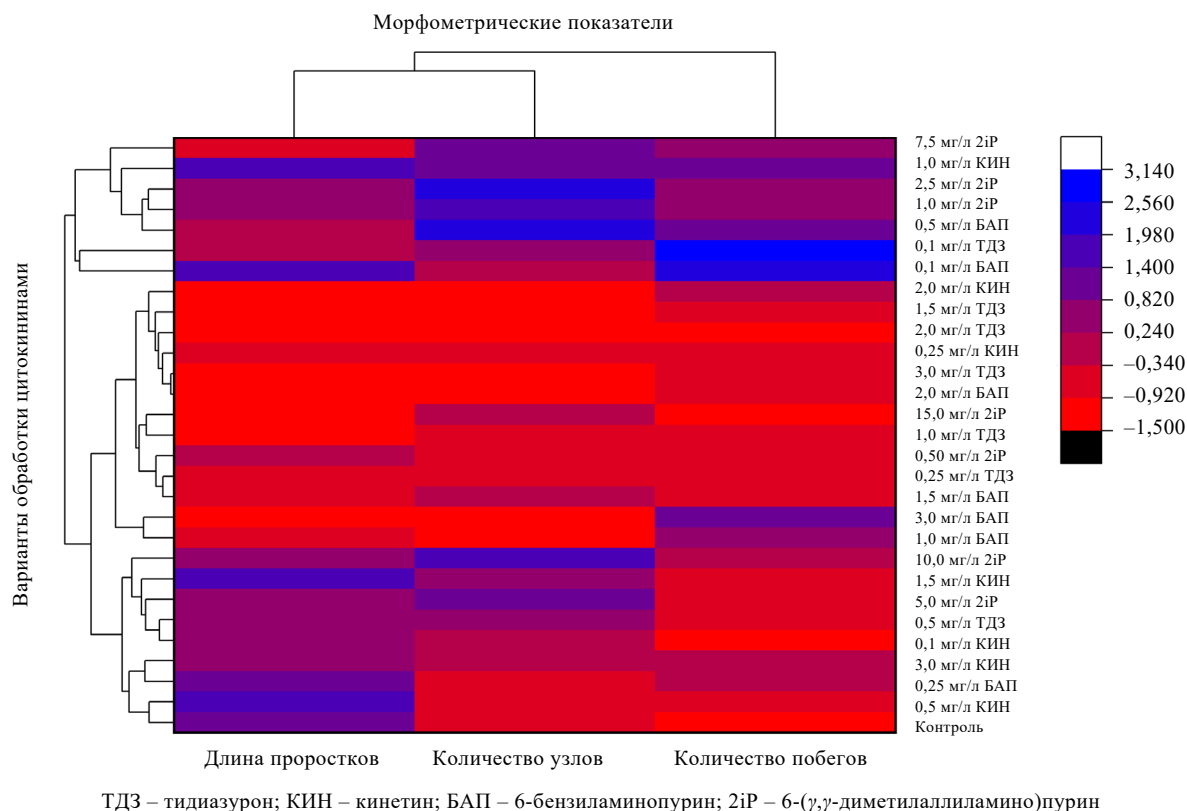


Рисунок 5. Тепловая карта морфометрических показателей микрорастений *Hyssopus officinalis* L. *in vitro*

Figure 5. Heatmap of morphometric characteristics of *Hyssopus officinalis* L. microplants *in vitro*

отобраны для последующего анализа содержания биологически активных веществ и антиоксидантной активности.

В результате установлено, что добавление в среду БАП в концентрации 0,1 мг/л привело к пятикратному увеличению уровня фенольных соединений ( $45,2 \pm 2,5$  мг-экв. ГК/г СМ) по сравнению с контролем, что соответствует максимальному показателю среди всех исследуемых концентраций (рис. 6). Концентрации КИН (0,1 мг/л) и ТДЗ (0,1 мг/л) стимулировали накопление фенольных соединений до  $40,8 \pm 4,2$  и  $29,7 \pm 5,9$  мг-экв. ГК/г СМ соответственно. Контрольные микрорастения *in vitro*, выращенные на питательной среде без добавления регуляторов роста, содержали  $8,5 \pm 3,9$  мг-экв. ГК/г СМ.

Максимальное содержание фенольных соединений при добавлении БАП в концентрации 0,1 мг/л согласуется с наблюдениями на *Melissa officinalis* L., где БАП также стимулировал накопление общей суммы фенольных соединений [13]. В работе [24] на *H. officinalis*, напротив, максимальное содержание фенольных соединений достигнуто при добавлении ТДЗ в концентрации 1 мг/л. Расхождение с результатами объясняется, скорее всего, разницей в использованных концентрациях: в цитируемой работе все цитокинины тестировали при 1 мг/л, тогда как в данном исследовании БАП оказался эффективен при концентрации 0,1 мг/л, а ТДЗ в той же дозе уступал ему.

При изучении количественного содержания флавоноидов в исследованных экстрактах *H. officinalis* получена иная закономерность (рис. 7). Самый высокий показатель зарегистрирован при концентрации 0,1 мг/л ТДЗ ( $4,0 \pm 2,3$  мг-экв. рутина/г СМ) в питательной среде.

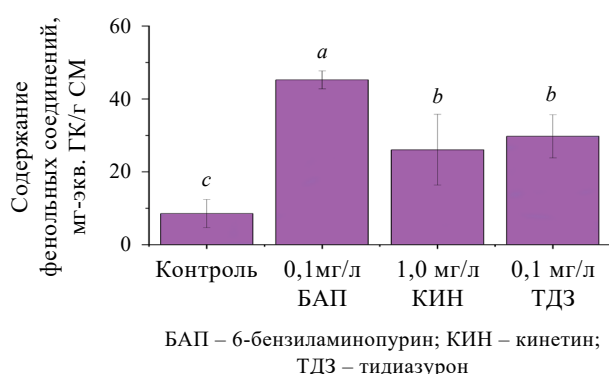


Рисунок 6. Сумма фенольных соединений в микрорастениях *in vitro* *Hyssopus officinalis* L. в зависимости от используемого цитокинина. Статистически значимые различия отмечены разными буквами (ANOVA, тест Тьюки (HSD),  $p \leq 0,05$ )

Figure 6. Total phenolics in *Hyssopus officinalis* L. microplants *in vitro* across cytokinins. Statistically significant differences are marked with different letters (ANOVA, Tukey test (HSD),  $p < 0.05$ )

В исследовании М. Ю. Чередниченко и др. [24] на *H. officinalis* сорте Лекарь не было выявлено влияния регуляторов роста на накопление флавоноидов, что обусловлено отличиями в используемых концентрациях и типах гормонов, в т. ч. отсутствием ТДЗ. Стоит отметить, что максимум накопления флавоноидов достигался при более высокой дозе ТДЗ (2 мг/л) [23]. Данные, полученные в рамках исследования, впервые показывают, что ТДЗ в низкой концентрации (0,1 мг/л) способен селективно усиливать синтез флавоноидов у этого сорта. Это различие, по-видимому, связано с особенностями роста или условиями выращивания.

Максимальное содержание гидроксикоричных кислот ( $115,9 \pm 3,2$  мг-экв. РК/г СМ) отмечено на среде с 0,1 мг/л БАП в питательной среде (рис. 8). Данная величина превышает контрольный уровень ( $21,7 \pm 5,9$  мг-экв. РК/г СМ) в 5 раз. При добавлении 1 мг/л КИН ( $82,5 \pm 5,5$  мг-экв. РК/г СМ) и 0,1 мг/л ТДЗ ( $46,5 \pm 12,9$  мг-экв. РК/г СМ) показатели также значимо превышали контроль, но эффект был ниже, чем при использовании БАП.

Антиоксидантная активность (DPPH-метод) также была максимальной в варианте с 0,1 мг/л БАП ( $72,8 \pm 2,8$  мг-экв. АК/г СМ), что статистически значимо превышало контроль ( $46,6 \pm 6,4$  мг-экв. АК/г СМ) (рис. 9). При добавлении кинетина (1,0 мг/л) этот показатель составил  $46,6 \pm 5,1$  и  $29,6 \pm 5,1$  мг-экв. АК/г СМ соответственно, не отличаясь достоверно от контроля.

Таким образом, применение БАП в концентрации 0,1 мг/л продемонстрировало максимальную эффективность, увеличивая содержание фенольных соединений, гидроксикоричных кислот и антиоксидантную активность, тогда как ТДЗ в концентрации 0,1 мг/л стимулировал накопление флавоноидов.

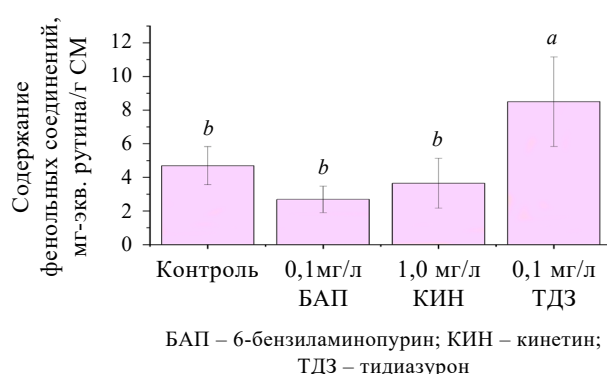


Рисунок 7. Сумма флавоноидов в микрорастениях *in vitro* *Hyssopus officinalis* L. в зависимости от используемого цитокинина. Статистически значимые различия отмечены разными буквами (ANOVA, тест Тьюки (HSD),  $p \leq 0,05$ )

Figure 7. Total flavonoids in *Hyssopus officinalis* L. microplants *in vitro* across cytokinins. Statistically significant differences are marked with different letters (ANOVA, Tukey test (HSD),  $p < 0.05$ )

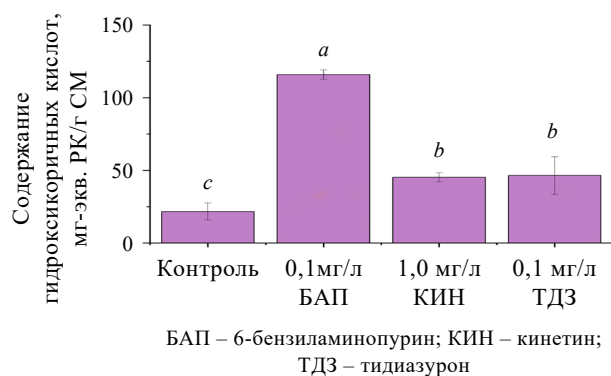


Рисунок 8. Сумма гидрохискоричных кислот в микрорастениях *in vitro* *Hyssopus officinalis* L. в зависимости от используемого цитокинина. Статистически значимые различия отмечены разными буквами (ANOVA, тест Тьюки (HSD),  $p \leq 0,05$ )

Figure 8. Hydroxycinnamic acids in *Hyssopus officinalis* L. microplants *in vitro* across cytokinins. Statistically significant differences are marked with different letters (ANOVA, Tukey test (HSD),  $p < 0.05$ )

## Выводы

В ходе исследования проведен подбор различных методов стерилизации семян *Hyssopus officinalis* L. сорта Лекарь. Установлено, что использование концентрированной серной кислоты в комбинации с последующей обработкой этанолом и гипохлоритом натрия обеспечило максимальную стерильность (98 %) и всхожесть семян (99 %), что значительно превосходит результаты, полученные при применении других агентов (пероксида водорода, нитрата серебра и гипохлорита натрия без предварительной обработки серной кислотой).

Изучено влияние различных концентраций четырех регуляторов роста на размножение микрорастений *in vitro* *H. officinalis*. Показано, что для роста микрорастений наиболее эффективно использовать питательную среду Мурасиге-Скуга с добавлением 0,1 мг/л 6-бензиламинопурина (БАП) (обеспечивает максимальное увеличение длины побегов и их количества), 1,0 мг/л кинетина (стимулирует ризогенез и образование узлов) и 0,1 мг/л тидиазурина (ТДЗ) (индуцирует побегообразование). Все исследованные концентрации 6-( $\gamma,\gamma$ -диметилаллил amino)пурина подавляли рост побегов, поэтому данный цитокинин не рекомендуется для микроразмножения *H. officinalis*.

Выявлена зависимость накопления вторичных метаболитов и антиоксидантной активности от типа цитокинина. Добавление 0,1 мг/л БАП в питательную среду обеспечивает максимальное накопление фенольных соединений, гидрохискоричных кислот

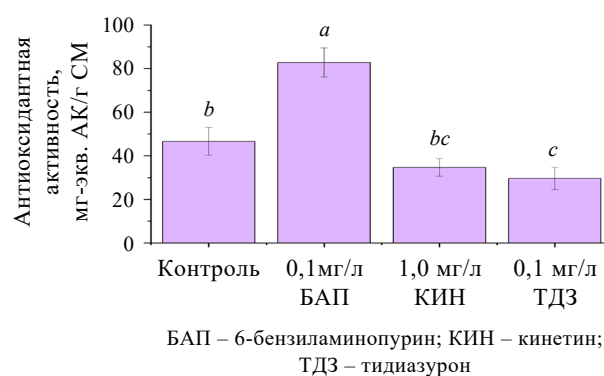


Рисунок 9. Влияние цитокининов на антиоксидантную активность экстрактов микрорастений *in vitro* *Hyssopus officinalis* L. Статистически значимые различия отмечены разными буквами (ANOVA, тест Тьюки (HSD),  $p \leq 0,05$ )

Figure 9. Effect of cytokinins on the antioxidant activity of *Hyssopus officinalis* L. microplant extracts *in vitro*. Statistically significant differences are marked with different letters (ANOVA, Tukey test (HSD),  $p < 0.05$ )

и антиоксидантную активность, тогда как 0,1 мг/л ТДЗ избирательно повышает содержание флавоноидов.

Практическая значимость результатов заключается в возможности направленного регулирования биохимического профиля микрорастений *in vitro* *H. officinalis* путем выбора соответствующего регулятора роста. Для внедрения предложенных протоколов в промышленность необходимы дальнейшие исследования качественного состава вторичных метаболитов.

## Критерии авторства

Е. А. Попова – методология, проведение экспериментальных исследований, обработка результатов и подготовка статьи. О. В. Кригер – концептуализация исследования, редактирование статьи. Все авторы ознакомились и согласились с опубликованной версией рукописи.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## Contribution

E.A. Popova developed the methodology, conducted the experimental studies, processed the results, and wrote the manuscript. O.V. Kriger developed the research concept and proofread the manuscript. Both authors approved the final version of the manuscript.

## Conflict of interest

The authors state that there is no conflict of interest.

## Список литературы / References

1. Захарова И. Н., Пупыкина К. А., Пупыкина В. В. Исторические аспекты применения фитотерапии и особенности ее использования в педиатрической практике. Педиатрия. Consilium Medicum. 2025. № 1. С. 80–89. [Zakharova I.N.,



- Pupykina KA, Pupykina VV. Historical aspects of phytotherapy application and features of use in pediatric practice: A review. *Pediatrics. Consilium Medicum*. 2025;(1):80–90. (In Russ.)] <https://doi.org/10.26442/26586630.2025.1.203185>
2. Monalisa, Fakih M, Perbawati C. Relevance of WHO traditional medicine strategy (2014–2023) with traditional health care policy in the perspective of national law and international law. *Asian Journal of Legal Studies*. 2022;1(1):25–34. <https://doi.org/10.53402/ajls.v1i1.117>
3. Tahir M, Khushtar M, Fahad M, Rahman MA. Phytochemistry and pharmacological profile of traditionally used medicinal plant Hyssop (*Hyssopus officinalis* L.). *Journal of Applied Pharmaceutical Science*. 2018;8(7):132–140. <https://doi.org/10.7324/JAPS.2018.8721>
4. 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>
5. 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>
6. Babich O, Larina V, Krol O, Ulrikh E, Sukhikh S, et al. *In vitro* study of biological activity of *Tanacetum vulgare* extracts. *Pharmaceutics*. 2023;15(2):616. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics15020616>
7. Люц В. А., Харлов С. Ю., Величкович Н. С., Проскурякова Л. А., Остапова Е. В. и др. Антимикробные свойства экстрактов *Pulmonaria officinalis*, *Heracleum sibiricum*, *Syringa vulgaris*, произрастающих в Сибири. *Техника и технология пищевых производств*. 2025. Т. 55. № 3. С. 673–686. [Lutz VA, Harlov SYu, Velichkovich NS, Proskuryakova LA, Ostapova EV, et al. Antimicrobial properties of siberian wild plant extracts: *Pulmonaria officinalis*, *Heracleum sibiricum*, and *Syringa vulgaris*. *Food Processing: Techniques and Technology*. 2025;55(3):673–686. (In Russ.)] <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2025-3-2597>
8. Попова Е. А., Пунгин А. В., Пантюхина А. П., Кроль О. В. Оценка содержания вторичных метаболитов и антиоксидантной активности экстрактов каллусных культур и микрорастений *in vitro* *Hyssopus officinalis* L. *Техника и технология пищевых производств*. 2024. Т. 54. № 4. С. 658–674. [Popova EA, Pungin AV, Pantyukhina AP, Krol OV. Evaluating secondary metabolites and antioxidant activity of *in vitro* callus and micro-plant extracts of *Hyssopus officinalis* L. *Food Processing: Techniques and Technology*. 2024;54(4):658–674. (In Russ.)] <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-4-2534>
9. Akharaiyi FC, Ehis-Eriakha CB, Olagbemide PT, Igbudu FH. *Hyptis suaveolens* L. leaf extracts in traditional health care systems. *Foods and Raw Materials*. 2023;11(2):293–299. <https://doi.org/10.21603/2308-40572023-2-577>
10. Sayyahi J, Mobaiyen H, Jafari B, Jafari-Sales A. Antibacterial effects of methanolic extracts of *Reum ribes* L. and *Hyssopus officinalis* L. on some standard pathogenic bacteria. *Jorjani Biomedicine Journal*. 2019;7(3):34–44. <https://doi.org/10.29252/jorjanibiomedj.7.3.34>
11. Sharifi-Rad J, Quispe C, Kumar M, Akram M, Amin M, et al. *Hyssopus* essential oil: An update of its phytochemistry, biological activities, and safety profile. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*. 2022;2022:8442734. <https://doi.org/10.1155/2022/8442734>
12. Попова Е. А. Влияние засоления на состав вторичных метаболитов и антиоксидантную активность экстрактов каллусных культур *Hyssopus officinalis* L. *Техника и технология пищевых производств*. 2025. Т. 55. № 4. С. 767–777. [Popova EA. Effect of salinity on secondary metabolites and antioxidant activity in callus extracts of *Hyssopus officinalis* L. *Food Processing: Techniques and Technology*. 2025;55(4):767–777. (In Russ.)] <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2025-4-2604>
13. Tungmunthum D, Thongboonyou A, Pholboon A, Yangsabai A. Flavonoids and other phenolic compounds from medicinal plants for pharmaceutical and medical aspects: An overview. *Medicines*. 2018;5(3):93. <https://doi.org/10.3390/medicines5030093>
14. Mutha RE, Tatiya AU, Surana SJ. Flavonoids as natural phenolic compounds and their role in therapeutics: An overview. *Future Journal of Pharmaceutical Sciences*. 2021;7(1):25. <https://doi.org/10.1186/s43094-020-00161-8>
15. Hosseini B, Alizadeh M, Hassani A, Jafari M, Rahimi A. High-frequency *in vitro* direct shoot regeneration from nodal explants of hyssop plant (*Hyssopus officinalis* L.). *Journal of Medicinal Plants and By-products*. 2016;5(2):187–193.
16. Singh RK, Chokheli VA. Plant biotechnology: Applications in *in vitro* plant conservation and micropropagation. *Horticulturae*. 2025;11(4):358. <https://doi.org/10.3390/horticulturae11040358>
17. Pasternak TP, Steinmacher D. Plant growth regulation in cell and tissue culture *in vitro*. *Plants*. 2024;13(2):327. <https://doi.org/10.3390/plants13020327>
18. Medeiros APR, Leite JF, Assis RMAD, Rocha JPM, Bertolucci SKV, et al. Exogenously applied growth regulators affect the growth, phenols, protein and essential oil composition *Melissa officinalis*. *Revista Ciência Agronômica*. 2025;56:e202391743. <https://doi.org/10.5935/1806-6690.20250050>
19. Pourebadi N, Motafakkerzad R, Kosari-Nasab M, Farsad Akhtar N, Movafeghi A. The influence of TDZ concentrations on *in vitro* growth and production of secondary metabolites by the shoot and callus culture of *Lallemantia iberica*. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*. 2015;122:331–339. <https://doi.org/10.1007/s11240-015-0769-4>

20. Varmazyar M, Shahhoseini R, Salehi Arjmand H, Akramian M. Phytochemical-growth responses of lemon balm (*Melissa officinalis* L.) to gibberellic acid and benzyladenine under different nutritional conditions. *Journal of Medicinal Plants and By-Products*. 2025;14(1):541–548. <https://doi.org/10.22034/jmpb.2025.367614.1817>
21. Zayova E, Geneva M, Stancheva I, Dimitrova L, Petrova M, *et al.* Evaluation of the antioxidant potential of *in vitro* propagated hyssop (*Hyssopus officinalis* L.) with different plant growth regulators. *Medicinal Plants-International Journal of Phytomedicines and Related Industries*. 2018;10(4):295–304. <https://doi.org/10.5958/0975-6892.2018.00044.8>
22. Sadat-Hosseini M, Askari N. Effects of culture media and plant growth regulators on micropropagation and root architecture of the hyssop medicinal plant (*Hyssopus officinalis* L.) under *in vitro* conditions. *Journal of Crops Improvement*. 2024;26(2):409–421. <https://doi.org/10.22059/jci.2024.363422.2837>
23. Shoja HM, Shishavan HK. Effects of different hormonal treatments on growth parameters and secondary metabolite production in organ culture of *Hyssopus officinalis* L. *Biotechnologia*. 2021;102(1):33. <https://doi.org/10.5114/bta.2021.103760>
24. Чередниченко М. Ю., Хлебникова Д. А., Федотова П. А., Брем Е. С., Романенко В. А. Влияние условий культивирования на рост и накопление биологически активных веществ иссопа лекарственного (*Hyssopus officinalis* L.) в условиях *in vitro*. Вопросы биологической, медицинской и фармацевтической химии. 2024. Т. 27. № 5. С. 50–58. [Cherednichenko MYu, Khlebnikova DA, Fedotova PA, Brem ES, Romanenko VA. Influence of cultivation conditions on the growth and accumulation of biologically active substances of *Hyssopus officinalis* L. under *in vitro* conditions. *Problems of Biological, Medical and Pharmaceutical Chemistry*. 2024;27(5):50–58. (In Russ.)] <https://doi.org/10.29296/25877313-2024-05-06>
25. Федотова П. А., Жданова М. В., Чередниченко М. Ю. Изучение влияния гормонального состава питательной среды на эффективность клонального микроразмножения *Hyssopus officinalis* сорта Иней: материалы Междунар. конф. молодых ученых «Биотехнология в растениеводстве, животноводстве и сельскохозяйственной микробиологии». Москва, 2023. С. 115–117. [Fedotova PA, Zhdanova MV, Cherednichenko MY. Study of the effect of the hormonal composition of the nutrient medium on the effectiveness of clonal micropropagation of *Hyssopus officinalis* of the Hoarfrost variety: Proceeding Intern. Sci. Conf. Moscow, 2023. pp. 115–117. (In Russ.)]
26. Murashige T, Skoog F. A revised medium for rapid growth and bio assays with tobacco tissue cultures. *Physiologia Plantarum*. 1962;15(3):473–497. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1962.tb08052.x>
27. Feduraev P, Skrypnik L, Nebreeva S, Dzhobadze G, Vatagina A, *et al.* Variability of phenolic compound accumulation and antioxidant activity in wild plants of some *Rumex* species (*Polygonaceae*). *Antioxidants*. 2022;11(2):311. <https://doi.org/10.3390/antiox11020311>
28. Padhi EM, Liu R, Hernandez M, Tsao R, Ramdath DD. Total polyphenol content, carotenoid, tocopherol and fatty acid composition of commonly consumed Canadian pulses and their contribution to antioxidant activity. *Journal of Functional Foods*. 2017;38:602–611. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2016.11.006>
29. Štefan MB, Rodríguez VJ, Blažeković B, Kindl M, Vladimir-Knežević S. Total hydroxycinnamic acids assay: Prevalidation and application on *Lamiaceae* species. *Food Analytical Methods*. 2013;7(2):326–336. <https://doi.org/10.1007/s12161-013-9630-8>
30. Skrypnik L, Feduraev P, Golovin A, Maslennikov P, Belov N, *et al.* Biotechnological potential of different organs of Mistletoe (*Viscum album* L.) collected from various host tree species in an urban area. *Plants*. 2022;11(20):2686. <https://doi.org/10.3390/plants11202686>

#### Дополнительная информация об авторах / Additional information about the authors

Попова Елена Александровна / Elena A. Popova ORCID 0000-0001-7008-3823; eLIBRARY SPIN 9577-5085  
Кригер Ольга Владимировна / Olga V. Kriger ORCID 0000-0002-1489-0716; eLIBRARY SPIN 4981-1381

<https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-3-2652>  
<https://elibrary.ru/TMPWBG>

Оригинальная статья  
<https://fptt.ru>

## Управление микрофлорой ржанных заварок при дискретном режиме производства хлеба



О. В. Чугунова<sup>1,\*</sup>, Р. Т. Тимакова<sup>1</sup>, А. В. Акулич<sup>2</sup>,  
Т. Д. Самуйленко<sup>2</sup>, Е. С. Лыбенко<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Уральский государственный экономический университет<sup>ROR</sup>, Екатеринбург, Россия

<sup>2</sup> Белорусский государственный университет пищевых и химических технологий, Могилев, Беларусь

<sup>3</sup> Вятский государственный агротехнологический университет<sup>ROR</sup>, Киров, Россия

Поступила в редакцию: 15.05.2026

Принята после рецензирования: 07.07.2026

Принята к публикации: 04.08.2026

\*e-mail: [Chugunova@usue.ru](mailto:Chugunova@usue.ru)

© О. В. Чугунова, Р. Т. Тимакова, А. В. Акулич,  
Т. Д. Самуйленко, Е. С. Лыбенко, 2026



### Аннотация.

В технологии заварного хлеба ключевую роль играют ржанные заварки – сложные микробиологические системы, в которых консорциумы молочнокислых бактерий (*Lactiplantibacillus plantarum*, *Lactobacillus delbrueckii*, *Fructilactobacillus sanfranciscensis*) и дрожжей (*Saccharomyces cerevisiae*, *Kazachstania humilis*) определяют органолептические, структурно-механические и питательные свойства готовых изделий. Стабильность и активность заквасочной микрофлоры зависят от состава среды и наличия внешних модуляторов, в качестве которых могут выступать нетрадиционные растительные компоненты – источники полифенолов, терпеноидов и эфирных масел. Цель исследования – установить количественные закономерности влияния порошков коры дуба (*Quercus robur*), травы эхинацеи пурпурной (*Echinacea purpurea*), листа шалфея лекарственного (*Salvia officinalis*) и травы полыни горькой (*Artemisia absinthium*) на динамику роста, кислотонакопление и метаболическую активность молочнокислых бактерий и дрожжей, культивируемых в ржанных заварках, с учетом варьирования технологических параметров (температуры и продолжительности) в дискретном режиме производства заварного хлеба.

Объектом исследования служила сброженная заварка на основе осахаренной и термофильной заквашенной заварки, приготовленная с внесением порошков коры дуба (до 0,180 % от массы муки), травы эхинацеи пурпурной (до 0,050 %), листа шалфея (до 0,140 %) и травы полыни горькой (до 0,015 %). Для получения термофильной заквашенной заварки использовали чистую культуру *L. delbrueckii* штамм 76. Эксперименты проводили в лабораториях кафедры технологии хлебопродуктов Белорусского государственного университета пищевых и химических технологий (Республика Беларусь), а также Единого лабораторного комплекса Уральского государственного экономического университета (Екатеринбург, Россия). В работе применяли стандартные микробиологические (посев на питательные среды), физико-химические (титруемая кислотность, определение органических кислот по МВИ.МН 2769-2007) и статистические (регрессионный анализ, однофакторный дисперсионный анализ ANOVA с пост-хок критерием Тьюки, Statgraphics Plus 5.0) методы.

Методом полного факторного эксперимента получены регрессионные уравнения ( $R^2 > 0,95$ ), описывающие влияние концентрации фитодобавок (0,015–0,180 %), температуры (25–55 °С) и продолжительности (60–480 мин) на показатели ржанных заварок. Установлено, что кора дуба обеспечивает максимальный прирост молочнокислых бактерий ( $1695,4 \times 10^6$  КОЕ/г); полынь горькая ингибирует микрофлору при концентрации выше 0,015 %. Внесение фитодобавок снижает содержание молочной кислоты (с 6,79 до 3,60–5,21 г/кг) и увеличивает содержание уксусной (с 0,20 до 0,40–0,85 г/кг), что расширяет вкусоароматический профиль заварок.

Полученные зависимости позволяют целенаправленно регулировать биотехнологические процессы в ржанных полуфабрикатах при дискретном производстве заварного хлеба. Применение исследованных фитодобавок расширяет вкусоароматический профиль сброженной заварки и улучшает потребительские свойства готовых изделий.

**Ключевые слова.** Заварной хлеб, ржанные заварки, иммобилизация микроорганизмов, молочнокислые бактерии, дрожжи, кора дуба, эхинацея пурпурная, шалфей, полынь горькая

**Для цитирования:** Чугунова О. В., Тимакова Р. Т., Акулич А. В., Самуйленко Т. Д., Лыбенко Е. С. Управление микрофлорой ржанных заварок при дискретном режиме производства хлеба. Техника и технология пищевых производств. 2026. Т. 56. № 3. С. 492–503. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-3-2652>

## Control of Rye Scolding Microflora in Discrete Bread Production



Olga V. Chugunova<sup>1,\*</sup>, Roza T. Timakova<sup>1</sup>, Alexander V. Akulich<sup>2</sup>,  
Tatyana D. Samoylenko<sup>2</sup>, Elena S. Lybenko<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Ural State University of Economics, Yekaterinburg, Russia

<sup>2</sup> Belarusian State University of Food and Chemical Technologies, Mogilev, Belarus

<sup>3</sup> Vyatka State Agrotechnological University, Kirov, Russia

Received: 15.05.2026

Revised: 07.07.2026

Accepted: 04.08.2026

\*e-mail: [Chugunova@usue.ru](mailto:Chugunova@usue.ru)

© O.V. Chugunova, R.T. Timakova, A.V. Akulich,  
T.D. Samuylenko, E.S. Lybenko, 2026



### Abstract.

In scalded breadmaking technology, scalded rye mixes are complex microbiological systems based on consortia of lactic acid bacteria (*Lactiplantibacillus plantarum*, *Lactobacillus delbrueckii*, *Fructilactobacillus sanfranciscensis*) and yeasts (*Saccharomyces cerevisiae*, *Kazachstania humilis*). They determine the sensory, rheological, and nutritional properties of the finished products. The stability and activity of the starter microflora depend on the composition of the medium and the presence of external modulators, which may include non-traditional plant components – sources of polyphenols, terpenoids, and essential oils. The aim of the study was to establish quantitative patterns of the effect of oak bark (*Quercus robur*), *Echinacea purpurea*, *Salvia officinalis*, and *Artemisia absinthium* powders on the growth dynamics, acid accumulation, and metabolic activity of lactic acid bacteria and yeasts cultivated in scalded rye mixes under varying technological parameters (temperature and duration) in a discrete scalded bread production mode.

The experimental fermented scalded mix was based on a saccharified and thermophilic sourdough starter with oak bark powder ( $\leq 0.180\%$  of flour weight), *Echinacea purpurea* ( $\leq 0.050\%$ ), sage leaf ( $\leq 0.140\%$ ), and *Artemisia absinthium* ( $\leq 0.015\%$ ). A pure culture of *L. delbrueckii* strain 76 was used as the starter. The experiments were conducted at the laboratories of the Belarusian State University of Food and Chemical Technologies (Republic of Belarus) and the Unified Laboratory Complex of the Ural State University of Economics (Yekaterinburg, Russia). The research involved standard microbiological, physicochemical, and statistical methods.

The fermentation lasted 60–480 min at 45–55°C for the sourdough samples and 25–35°C for the scalded mixes. Oak bark provided the maximum increase in lactic acid bacteria ( $1695.4 \times 10^6$  CFU/g), while *Artemisia absinthium* inhibited the microflora at concentrations above 0.015%. The addition of phytochemical components reduced lactic acid content (from 6.79 to 3.60–5.21 g/kg) and increased acetic acid content (from 0.20 to 0.40–0.85 g/kg), thus expanding the flavor profile of the scalded mixes.

These correlations enable the targeted regulation of biotechnological processes in rye semi-finished products during discrete scalded bread production. The plant additives expand the flavor profile of fermented scalded mixes while improving the consumer properties of the finished products.

**Keywords.** Scalded bread, rye scalding mix, immobilization of microorganisms, lactic acid bacteria, yeasts, *Quercus robur*, *Echinacea purpurea*, *Salvia officinalis*, *Artemisia absinthium*

**For citation:** Chugunova OV, Timakova RT, Akulich AV, Samuylenko TD, Lybenko ES. Control of Rye Scolding Microflora in Discrete Bread Production. Food Processing: Techniques and Technology. 2026;56(3):492–503. (In Russ.) <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-3-2652>

### Введение

В мире неуклонно растет потребность в продуктах функциональной направленности [1–4]. Этот тренд прямо пропорционален уровню осведомленности покупателей об их пользе [5]. Значимость ржаного хлеба трудно переоценить. Недавние исследования показали, что его регулярное потребление снижает уровень холестерина в крови примерно на 12 %, что обусловлено химическим составом [6]. Включение

ржаного хлеба в рацион связывают с более низкой частотой возникновения диабета 2 типа, сердечно-сосудистых заболеваний и их факторов риска. Данный продукт вызывает более низкую инсулиновую реакцию организма [7], позволяет корректировать вес и модулировать микробиоту кишечника [8]. Кроме того, потребление ржаного хлеба в качестве вспомогательного метода лечения смягчает проявления синдрома раздраженного кишечника [9].



Известно, что ржаной хлеб готовится на закваске, которая не только придает хлебу определенные свойства, но и рассматривается в качестве полезного для здоровья человека продукта. Закваска является благоприятной средой обитания различных микроорганизмов. При этом каждая закваска уникальна и характеризуется собственным составом популяций микроорганизмов, их активностью и взаимодействием [10–12].

Ржаные закваски на заварках представляют собой микробиологические системы, в которых консорциумы молочнокислых бактерий (*Lactiplantibacillus plantarum*, *Lactobacillus delbrueckii*, *Fructilactobacillus sanfranciscensis*) и дрожжей (*Saccharomyces cerevisiae*, *Kazachstaniana humilis*) определяют органолептические, структурно-механические и питательные свойства конечного продукта [13]. Устойчивость и активность заквасочной микрофлоры зависят от ряда факторов, включая биохимический состав среды, параметры ферментации и наличие внешних модуляторов, например нетрадиционных растительных компонентов.

Биохимическая среда ржаных заквасок на заварке по сравнению с обычными заквасками отличается повышенным количеством доступных питательных веществ, образующихся в процессе заваривания части муки и последующего воздействия на заварку ферментов незаваренной муки. Такие закваски характеризуются высоким содержанием мальтозы, декстринов, свободных аминокислот и минеральных веществ, что создает селективные условия для развития специфических таксонов микроорганизмов [14].

Изменяя рецептурный состав заварок и технологические параметры их приготовления, можно влиять на вязкость заквасок и доступность питательных веществ. Вследствие этого в заквасках активизируются различные группы бактерий, обуславливающие изменения вкусовых и ароматических свойств готовых изделий [15, 16]. Готовые закваски должны обладать биосовместимостью микробных консорциумов, синергизмом внутри ассоциации, безопасностью для микрофлоры человека, а также стабильностью при внесении функциональных и профилактических ингредиентов [18].

С развитием функционального питания и ресурсосберегающих технологий активизировался научный интерес к использованию нетрадиционных растительных компонентов в качестве модуляторов ферментационных процессов [18–21]. Продукты переработки коры дуба (*Quercus robur*), эхинацеи пурпурной (*Echinacea purpurea*), шалфея лекарственного (*Salvia officinalis*) и полыни горькой (*Artemisia absinthium*) содержат комплекс биоактивных соединений – полифенолов (фенольные кислоты, флавоноиды, конденсированные танины), терпеноидов и эфирных масел, которые могут служить дополнительными субстратами для микроорганизмов, модулировать их метаболическую активность, проявлять селективные антимикробные свойства

в отношении контаминантной микрофлоры, а также обогащать конечный продукт антиоксидантными соединениями [22].

Полифенольные соединения оказывают двойственное влияние на микроорганизмы заквасок. С одной стороны, многие из них обладают выраженной антимикробной активностью, реализуемой через механизмы нарушения целостности цитоплазматических мембран, ингибирования ключевых ферментов (АТФ-аз, дегидрогеназ) и хелатирования ионов металлов, необходимых для метаболизма [23]. В частности, экстракты коры дуба, богатые эллаговой кислотой и проантоцианидинами, оказывают ингибирующее действие в отношении ряда грамположительных и грамотрицательных бактерий, включая отдельные штаммы *Staphylococcus aureus* и *Escherichia coli* [24].

В то же время отдельные штаммы молочнокислых бактерий, в т. ч. *L. plantarum* и *Leuconostoc mesenteroides*, обладают ферментативными системами (эстеразы,  $\beta$ -глюкозидазы, таниназы), позволяющими не только игнорировать, но и трансформировать определенные полифенольные структуры. Исследования показали, что ферментация растительных экстрактов с участием *L. plantarum* сопровождается увеличением содержания свободных фенольных кислот за счет гидролиза их гликозидных форм или эфирных связей с матрицей растительного материала [25]. Более того, отдельные метаболиты полифенолов, образующиеся в процессе бактериальной биотрансформации, могут обладать повышенной антиоксидантной активностью по сравнению с исходными соединениями [26].

Полифенолы растительного сырья влияют на окислительно-восстановительный потенциал (ОВП) и буферную емкость среды ферментации. Снижение ОВП, характерное для активной фазы роста микроорганизмов, может способствовать стабилизации лабильных фенольных соединений, тогда как присутствие определенных полифенолов способно модулировать редокс-статус, влияя на метаболические пути микроорганизмов и скорость ацидификации [27]. Высокая буферная емкость белковых и минеральных компонентов растительного сырья замедляет снижение pH, что, в свою очередь, сказывается на активности ферментов, росте дрожжей и подавлении патогенной микрофлоры.

Взаимодействие фитохимических компонентов с дрожжевой микрофлорой изучено в меньшей степени. Известно, что многие фенольные соединения обладают фунгистатической активностью: экстракты эхинацеи и шалфея в определенных концентрациях могут ингибировать рост *S. cerevisiae* за счет нарушения целостности клеточной мембраны и ингибирования дыхательных ферментов [28]. Кроме того, низкие концентрации отдельных полифенолов (например кверцетина) стимулируют метаболическую активность дрожжей, повышая скорость ферментации сахаров и продукцию ароматических соединений.

Несмотря на наличие отдельных исследований влияния растительных экстрактов на физико-химические показатели ржаных полуфабрикатов [29], систематизированные данные о механизмах воздействия нетрадиционного сырья на видовой состав, жизнеспособность и метаболический профиль микроорганизмов ржаных заварок остаются фрагментарными. Особенно малоизученными являются технологические процессы в условиях дискретного производственного цикла предприятий хлебопекарной промышленности, где параметры ферментации (температура, длительность, кратность освежения) варьируются в широких пределах.

Цель исследования – установить количественные закономерности влияния порошков коры дуба (*Q. robur*), травы эхинацеи пурпурной (*E. purpurea*), листа шалфея лекарственного (*S. officinalis*) и травы полыни горькой (*A. absinthium*) на динамику роста, кислотонакопление и метаболическую активность молочнокислых бактерий и дрожжей, культивируемых в ржаных заварках, с учетом варьирования технологических параметров (температуры и продолжительности) в дискретном режиме производства заварного хлеба.

Для достижения поставленной цели сформулированы следующие задачи:

- оценить влияние растительных добавок различной концентрации на кинетику ацидификации и профиль накопления органических кислот в модельных системах ржаных заварок;
- проанализировать жизнеспособность и метаболическую активность целевых штаммов микроорганизмов при варьировании состава фитохимических компонентов;
- выявить взаимосвязи между биохимическим составом растительного сырья, параметрами ферментации и функциональными свойствами заквасочной микрофлоры.

Актуальность работы обусловлена потребностью в научно обоснованных подходах к использованию нетрадиционного растительного сырья в технологии ржаных заквасок, позволяющих одновременно повышать пищевую ценность продукции, обеспечивать стабильность технологического процесса и расширять ассортимент хлебобулочных изделий функционального назначения.

Научная новизна исследования заключается в установлении количественных закономерностей влияния порошков коры дуба, эхинацеи пурпурной, шалфея и полыни горькой на кинетику роста молочнокислых бактерий и дрожжей в ржаных заварках при варьировании температуры (25–55 °C) и продолжительности (60–480 мин) ферментации, что позволяет целенаправленно регулировать биотехнологические процессы в дискретном производстве заварного хлеба.

#### Объекты и методы исследования

Объект исследования – сброженная заварка, полученная на основе осахаренной и термофильной заквашенной заварки в производственных условиях.

Для получения термофильной заквашенной заварки использовали чистую культуру молочнокислых бактерий *Lactobacillus delbrueckii* штамм 76 – промышленный стартер, традиционно применяемый в хлебопекарной отрасли для приготовления термофильных заквашенных заварок для заварных сортов хлеба.

Сброженную заварку синтезировали путем заваривания рецептурной смеси (ржаной заварки) из муки ржаной сеяной, солода ржаного неферментированного и порошков растительных добавок: коры дуба (до 0,180 % от массы муки), травы эхинацеи пурпурной (до 0,050 %), листа шалфея (до 0,140 %) или травы полыни горькой (до 0,015 %). Дозировки приведены по унифицированной рецептуре. Выбор добавок обусловлен их доступностью в регионе, признанным высоким содержанием полифенольных соединений (дуб, эхинацея), выраженными антимикробными свойствами (шалфей) и способностью модулировать пищеварение (полынь). Ранее данные растительные добавки не применялись системно для регулирования микробиоты ржаных заварок.

Содержание нетрадиционных сырьевых компонентов в рецептурной смеси устанавливали с учетом среднесуточного потребления хлебобулочных изделий и адекватного уровня потребления отдельных веществ, входящих в их состав (дубильных веществ – для порошка коры дуба; оксикоричных кислот – для травы эхинацеи пурпурной; эфирного масла – для листа шалфея; показателя горечи – для травы полыни горькой). Влажность ржаной заварки поддерживали на уровне 74–76 %. Затем ее подвергали осахариванию в течение 90 мин и естественному охлаждению до температуры заквашивания.

В дискретном режиме производства заварного хлеба заквашивание ржаной заварки осуществляли путем смешивания термофильной заквашенной заварки предыдущего приготовления и осахаренной заварки в соотношении 50:50. Температуру поддерживали на уровне 45–55 °C, продолжительность – от 60 до 480 мин. Полученную термофильную заквашенную заварку направляли на охлаждение. Сбраживание выполняли путем смешивания сброженной заварки и охлажденной термофильной заквашенной заварки в соотношении 50:50. Температуру поддерживали на уровне 25–35 °C, продолжительность – от 60 до 480 мин.

В мучной смеси с внесением нетрадиционных сырьевых компонентов для получения заварки оценивали следующие показатели безопасности: содержание гексахлорциклогексана – по ГОСТ 13496.20–2014; ДДТ и его метаболитов – по ГОСТ 13496.20–2014; кадмия и свинца – по ГОСТ 30178–96; мышьяка – по ГОСТ 31266–2004; ртути – по ГОСТ 33412–2015; обсемененность бактериями группы кишечной палочки (колиформы) – по ГОСТ 31747–2012, *Staphylococcus aureus* – по ГОСТ 31746–2012 и плесенью – по ГОСТ 10444.12–2013. Исследования проводили в Ветеринарно-

санитарном учреждении «Могилевская областная ветеринарная лаборатория» Министерства сельского хозяйства и продовольствия Республики Беларусь.

Минеральный состав мучной смеси с внесением нетрадиционных сырьевых компонентов для получения заварки исследовали по содержанию фосфора (СТБ ISO 11885–2011), кальция (СТБ ISO 11885–2011), магния (СТБ ISO 11885–2011) и железа (ГОСТ 30178–96). Анализы выполнены в Республиканском унитарном предприятии «Научно-практический центр гигиены» Министерства здравоохранения Республики Беларусь.

В термофильной заквашенной заварке определяли количество молочнокислых бактерий методом посева на питательные среды. Активность молочнокислых бактерий выявляли по методу М. П. Юргенсона и И. Ф. Романова, основанному на скорости изменения окраски красителя (с голубой на бесцветную). Кислотность термофильной заквашенной заварки анализировали титриметрическим методом.

В сброженной заварке устанавливали количество молочнокислых бактерий и дрожжей методом посева на питательные среды, активность молочнокислых бактерий, кислотность сброженной заварки и ее подъемную силу ускоренным методом.

Определение содержания органических кислот в сброженной заварке на основе осахаренной и термофильной заквашенной заварки с внесением нетрадиционных сырьевых компонентов проводили на базе лабораторий Республиканского унитарного предприятия «Научно-практический центр Национальной академии Наук Беларуси по продовольствию» (Республика Беларусь) по методике МВИ.МН 2769-2007, прошедшей метрологическую экспертизу.

Эксперименты выполняли в лабораториях кафедры технологии хлебопродуктов, технологии пищевых производств Белорусского государственного университета пищевых и химических технологий (Могилев, Республика Беларусь) и Единого лабораторного комплекса Уральского государственного экономического университета (Екатеринбург, Россия). Опыты повторяли 3–5 раз. Результаты обрабатывали статистическими методами с доверительной вероятностью 0,95. Ошибка опыта не превышала 5,0 %.

Для установления зависимости показателей ржаных заварок от содержания нетрадиционных сырьевых компонентов с учетом изменения технологических параметров их приготовления в дискретном режиме производства заварного хлеба использовали статистическую универсальную графическую систему STATGRAPHICS Plus 5.0. В качестве влияющих факторов выбраны: содержание отдельных нетрадиционных сырьевых компонентов ( $X_1$ , % от массы муки по унифицированной рецептуре), температура заквашивания ( $X_2$ , °C), продолжительность заквашивания ( $X_3$ , мин), температура сбраживания ( $X_4$ , °C), продолжительность сбраживания ( $X_5$ , мин). В качестве кри-

териев оценки влияния указанных факторов служили: количество молочнокислых бактерий в термофильной заквашенной заварке ( $Y_1 \times 10^6$ , КОЕ/г), активность молочнокислых бактерий в термофильной заквашенной заварке ( $Y_2$ , мин), кислотность термофильной заквашенной заварки ( $Y_3$ , град.), количество молочнокислых бактерий в сброженной заварке ( $Y_4 \times 10^6$ , КОЕ/г), активность молочнокислых бактерий в сброженной заварке ( $Y_5$ , мин), кислотность сброженной заварки ( $Y_6$ , град.), количество дрожжей в сброженной заварке ( $Y_7 \times 10^6$ , КОЕ/г), подъемная сила сброженной заварки ( $Y_8$ , мин).

Анализ содержания органических кислот проводили в трех повторностях. Результаты представлены в виде среднего арифметического и стандартного отклонения ( $M \pm SD$ ). Статистическую обработку выполняли с использованием однофакторного дисперсионного анализа (ANOVA) с пост-хок критерием Тьюки. Различия считали значимыми при  $p < 0,05$ .

### Результаты и их обсуждение

Внесение нетрадиционных сырьевых компонентов – порошка коры дуба, травы эхинаеи пурпурной, листа шалфея и травы полыни горькой – в состав мучных смесей для получения заварки не должно ухудшать показатели безопасности продукции. В таблице 1 представлены результаты оценки показателей безопасности для образцов мучных смесей без внесения и с внесением указанных компонентов.

Анализ результатов, представленных в таблице 1, свидетельствует, что внесение в состав мучных смесей порошков коры дуба, травы эхинаеи пурпурной, листа шалфея и травы полыни горькой в исследуемых концентрациях не влияло на показатели безопасности.

Порошки указанных растительных компонентов содержат различные минеральные элементы, способные стимулировать развитие культивируемых микроорганизмов. В таблице 2 отражены результаты исследования содержания отдельных минеральных элементов в составе мучных смесей без внесения и с внесением нетрадиционных сырьевых компонентов.

Внесение нетрадиционных сырьевых компонентов в состав мучных смесей, используемых для получения ржаных заварок, даже в незначительных количествах способствовало увеличению содержания отдельных минеральных элементов, что служит дополнительным стимулирующим фактором для роста и развития культивируемых микроорганизмов.

Для установления зависимостей показателей ржаных заварок от содержания нетрадиционных сырьевых компонентов (добавок) с учетом изменения технологических параметров их приготовления в дискретном режиме производства заварного хлеба, а также для целенаправленного управления процессом заквашивания выполнены исследования по плану полного факторного эксперимента  $(3 \times 2)^2$ , состоящего из 12 опытов (табл. 3).

Таблица 1. Показатели безопасности мучных смесей с внесением растительных компонентов

Table 1. Flour mixes with and without experimental components: Safety indicators

| Показатель                                                    | Контроль<br>(без добавок) | Порошок   |                                |              |                         |
|---------------------------------------------------------------|---------------------------|-----------|--------------------------------|--------------|-------------------------|
|                                                               |                           | Коры дуба | Травы<br>эхинацеи<br>пурпурной | Листа шалфея | Травы<br>полыни горькой |
| Гексахлорциклогексан, мг/кг                                   |                           |           |                                |              |                         |
| $\alpha$ -изомер                                              | н.о.                      | н.о.      | н.о.                           | н.о.         | н.о.                    |
| $\beta$ -изомер                                               | н.о.                      | н.о.      | н.о.                           | н.о.         | н.о.                    |
| $\gamma$ -изомер                                              | н.о.                      | н.о.      | н.о.                           | н.о.         | н.о.                    |
| ДДТ и его метаболиты, мг/кг                                   | н.о.                      | н.о.      | н.о.                           | н.о.         | н.о.                    |
| Кадмий, мг/кг                                                 | 0,012                     | 0,012     | 0,015                          | 0,013        | 0,012                   |
| Свинец, мг/кг                                                 | 0,022                     | 0,054     | 0,033                          | 0,030        | 0,026                   |
| Мышьяк, мг/кг                                                 | 0,050                     | 0,100     | 0,050                          | 0,048        | 0,049                   |
| Ртуть, мг/кг                                                  | 0,007                     | 0,006     | 0,005                          | 0,004        | 0,002                   |
| Бактерии группы кишечной палочки (колиформы) в 1,0 г продукта | н.о.                      | н.о.      | н.о.                           | н.о.         | н.о.                    |
| <i>Staphylococcus aureus</i> в 1,0 г продукта                 | н.о.                      | н.о.      | н.о.                           | н.о.         | н.о.                    |
| Плесень, КОЕ/г                                                | менее 10                  | менее 10  | менее 10                       | менее 10     | менее 10                |

Примечание: н.о. – не обнаружено.

Note: н.о. – not detected.

Таблица 2. Содержание минеральных элементов в мучных смесях с внесением растительных компонентов, мг/100 г

Table 2. Mineral content in flour mixes with added plant components, mg/100 g

| Минеральный элемент | Контроль<br>(без добавок) | Порошок        |                                |                |                         |
|---------------------|---------------------------|----------------|--------------------------------|----------------|-------------------------|
|                     |                           | Коры дуба      | Травы<br>эхинацеи<br>пурпурной | Листа шалфея   | Травы<br>полыни горькой |
| Фосфор              | 239,00 ± 34,00            | 237,00 ± 34,00 | 247,00 ± 35,00                 | 245,00 ± 34,00 | 240,00 ± 34,00          |
| Кальций             | 92,70 ± 13,80             | 95,00 ± 14,20  | 99,20 ± 14,80                  | 98,20 ± 14,20  | 94,40 ± 13,80           |
| Магний              | 61,30 ± 6,10              | 60,10 ± 6,00   | 69,70 ± 7,00                   | 67,80 ± 6,10   | 62,30 ± 6,10            |
| Железо              | 1,61 ± 0,16               | 1,79 ± 0,18    | 2,10 ± 0,21                    | 1,95 ± 0,20    | 1,70 ± 0,18             |

Таблица 3. План и результаты эксперимента на стадии заквашивания ржаной заварки с порошком коры дуба

Table 3. Experimental design and results at the fermentation stage of scalded rye mix with oak bark powder

| Опыт | Содержание добавки ( $X_1$ ), % от массы муки | Температура ( $X_2$ ), °C | Продолжительность ( $X_3$ ), мин | Количество молочнокислых бактерий ( $Y_1 \times 10^6$ ), КОЕ/г | Активность молочнокислых бактерий ( $Y_2$ ), мин | Кислотность ( $Y_3$ ), град. |
|------|-----------------------------------------------|---------------------------|----------------------------------|----------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|------------------------------|
| 1    | 0,00                                          | 45,0                      | 60,0                             | 1125,5                                                         | 120,0                                            | 7,8                          |
| 2    | 0,00                                          | 45,0                      | 480,0                            | 1545,5                                                         | 51,0                                             | 14,4                         |
| 3    | 0,00                                          | 55,0                      | 60,0                             | 977,7                                                          | 137,0                                            | 7,4                          |
| 4    | 0,00                                          | 55,0                      | 480,0                            | 1456,8                                                         | 69,0                                             | 11,7                         |
| 5    | 0,09                                          | 45,0                      | 60,0                             | 1183,1                                                         | 112,0                                            | 8,5                          |
| 6    | 0,09                                          | 45,0                      | 480,0                            | 1624,2                                                         | 41,0                                             | 15,3                         |
| 7    | 0,09                                          | 55,0                      | 60,0                             | 1033,3                                                         | 118,0                                            | 7,9                          |
| 8    | 0,09                                          | 55,0                      | 480,0                            | 1517,4                                                         | 54,0                                             | 12,9                         |
| 9    | 0,18                                          | 45,0                      | 60,0                             | 1256,2                                                         | 105,0                                            | 9,2                          |
| 10   | 0,18                                          | 45,0                      | 480,0                            | 1695,4                                                         | 36,0                                             | 16,2                         |
| 11   | 0,18                                          | 55,0                      | 60,0                             | 1144,4                                                         | 114,0                                            | 8,5                          |
| 12   | 0,18                                          | 55,0                      | 480,0                            | 1637,9                                                         | 46,0                                             | 14,9                         |



В качестве примера приведены результаты для порошка коры дуба – добавки, проявившей наибольший стимулирующий эффект. Экспериментальные данные для эхинацеи, шалфея и полыни (всего 48 опытов) обработаны по аналогичной схеме и легли в основу уравнений (4)–(12).

В результате обработки экспериментальных данных получены уравнения (1)–(12) для определения количества молочнокислых бактерий в термофильной заварке ( $Y_1 \times 10^6$ , КОЕ/г), их активности ( $Y_2$ , мин) и кислотности заварки ( $Y_3$ , град.) от содержания различных видов нетрадиционных сырьевых компонентов, температуры и продолжительности заквашивания ржаной заварки с учетом значимых коэффициентов: при внесении порошка коры дуба применимы уравнения (1)–(3); при внесении порошка травы эхинацеи пурпурной – уравнения (4)–(6); при внесении порошка листа шалфея – уравнения (7)–(9); при внесении порошка травы полыни горькой – уравнения (10)–(12).

$$Y_1 = (1789,95 - 463,33 \times X_1 - 16,07 \times X_2 + 0,45 \times X_3 + 0,0124 \times X_2 \times X_3) \times 10^6 \quad (1)$$

$$Y_2 = 66,88 + 38,89 \times X_1 + 1,42 \times X_2 - 0,20 \times X_3 + 432,10 \times X_1^2 - 4,44 \times X_1 \times X_2 \quad (2)$$

$$Y_3 = 9,95 - 11,83 \times X_1 - 0,062 \times X_2 + 0,032 \times X_3 - 0,00037 \times X_2 \times X_3 \quad (3)$$

$$Y_1 = (1761,72 - 458,86 \times X_1 - 15,50 \times X_2 + 0,57 \times X_3) \times 10^6 \quad (4)$$

$$Y_2 = 60,11 + 300,0 \times X_1 + 1,56 \times X_2 - 0,17 \times X_3 - 20,0 \times X_1 \times X_2 \quad (5)$$

$$Y_3 = 10,53 - 65,14 \times X_1 - 0,07 \times X_2 + 0,032 \times X_3 - 0,00037 \times X_2 \times X_3 \quad (6)$$

$$Y_1 = (1743,62 - 161,43 \times X_1 - 15,13 \times X_2 + 0,61 \times X_3 + 0,0093 \times X_2 \times X_3) \times 10^6 \quad (7)$$

$$Y_2 = 58,41 + 218,88 \times X_1 + 1,60 \times X_2 - 0,18 \times X_3 - 7,86 \times X_1 \times X_2 \quad (8)$$

$$Y_3 = 9,76 - 12,25 \times X_1 - 0,058 \times X_2 + 0,033 \times X_3 - 0,0004 \times X_2 \times X_3 \quad (9)$$

$$Y_1 = (1726,01 + 18333,0 \times X_1 - 14,77 \times X_2 + 0,47 \times X_3 + 0,012 \times X_2 \times X_3 - 356,88 \times X_1 \times X_2 + 294141,0 \times X_1^2) \times 10^6 \quad (10)$$

$$Y_2 = 52,95 + 2125,0 \times X_1 + 1,70 \times X_2 - 0,19 \times X_3 \quad (11)$$

$$Y_3 = 7,93 + 62,5 \times X_1 - 0,021 \times X_2 + 0,04 \times X_3 - 0,00054 \times X_2 \times X_3 \quad (12)$$

Для всех полученных зависимостей рассчитаны коэффициенты детерминации  $R^2$ , значения которых превышают 0,99.

Анализ уравнений (1), (4), (7) и (10) показывает, что характер влияния фитодобавок на количество молочнокислых бактерий ( $Y_1$ ) существенно различается. Максимальный прирост при внесении 0,18 % добавки достигался для коры дуба (уравнение (1), коэффициент  $+1695,4 \times 10^6$ ). Для эхинацеи пурпурной и шалфея (уравнения (4) и (7) соответственно) этот эффект выражен слабее и носит практически линейный характер. Напротив, полынь горькая (уравнение (10)) демонстрирует ярко выраженную нелинейность (наличие квадратичного члена  $(+294\,141,0 \times X_1^2)$  и высокого отрицательного перекрестного коэффициента  $(-356,88 \times X_1 \times X_2)$ , что свидетельствует о пороговом ингибирующем эффекте при концентрациях выше 0,015 %, особенно в сочетании с повышенной температурой заквашивания.

По показателям активности молочнокислых бактерий ( $Y_2$ ) и кислотности ( $Y_3$ ) кора дуба обеспечивала наиболее быстрое снижение активности ( $Y_2 = 36$  мин) и максимальное нарастание кислотности ( $Y_3 = 16,2$  град.) при концентрации 0,18 % и 480 мин ферментации. Для стадии сбраживания (уравнения (13)–(32)) максимальное количество бактерий ( $Y_4$ ) также отмечено при использовании коры дуба (уравнение (13)), тогда как эхинацея и шалфей давали близкие, но более низкие значения.

Таким образом, выбор фитодобавки должен определяться целевым направлением использования заварки: для максимального накопления биомассы молочнокислых бактерий и ускоренного кислотонакопления предпочтительна кора дуба; для щадящего метаболического воздействия с сохранением активности микроорганизмов – эхинацея или шалфей; при использовании полыни горькой требуется строгий контроль концентрации (не более 0,015 %) во избежание ингибирования целевой микрофлоры. Полученные количественные зависимости ( $R^2 > 0,95$ ) позволяют прогнозировать показатели ржаных заварок ( $Y_1$ – $Y_8$ ) в дискретном режиме производства без дополнительных экспериментальных серий, что обеспечивает стабильность качества заварного хлеба.

Для установления зависимостей показателей сброженной заварки от содержания нетрадиционных сырьевых компонентов с учетом изменения технологических параметров ее приготовления в дискретном режиме производства заварного хлеба, а также для целенаправленного управления процессом сбраживания проведены исследования по плану полного факторного эксперимента  $(3 \times 2)^2$ , состоящего из 12 опытов (табл. 4).

Аналогичные исследования по указанному плану полного факторного эксперимента выполнены для сброженной заварки, полученной на основе осахаренной и термофильной заквашенной заварки с порошками травы эхинацеи пурпурной, листа шалфея и травы полыни горькой.

Таблица 4. План и результаты эксперимента на стадии сбраживания ржаной заварки с порошком коры дуба

Table 4. Experimental design and results at the fermentation stage of scalded rye mix with oak bark powder

| Опыт | Содержание добавки ( $X_1$ ), % от массы муки | Температура ( $X_4$ ), °C | Продолжительность ( $X_5$ ), мин | Количество молочнокислых бактерий ( $Y_4 \times 10^6$ ), КОЕ/г | Активность молочнокислых бактерий ( $Y_5$ ), мин | Кислотность ( $Y_6$ ), град. | Количество дрожжей ( $Y_7 \times 10^6$ ), КОЕ/г | Подъемная сила ( $Y_8$ ), мин |
|------|-----------------------------------------------|---------------------------|----------------------------------|----------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|------------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------------|
| 1    | 0,00                                          | 25,0                      | 60,0                             | 1277,1                                                         | 115,0                                            | 10,2                         | 175,8                                           | 34,0                          |
| 2    | 0,00                                          | 25,0                      | 480,0                            | 1724,4                                                         | 67,0                                             | 15,4                         | 90,4                                            | 49,0                          |
| 3    | 0,00                                          | 35,0                      | 60,0                             | 1378,8                                                         | 96,0                                             | 11,0                         | 157,6                                           | 40,0                          |
| 4    | 0,00                                          | 35,0                      | 480,0                            | 1833,2                                                         | 50,0                                             | 16,2                         | 74,1                                            | 53,0                          |
| 5    | 0,09                                          | 25,0                      | 60,0                             | 1330,3                                                         | 110,0                                            | 9,6                          | 182,4                                           | 32,0                          |
| 6    | 0,09                                          | 25,0                      | 480,0                            | 1718,3                                                         | 70,0                                             | 13,8                         | 104,5                                           | 45,0                          |
| 7    | 0,09                                          | 35,0                      | 60,0                             | 1410,7                                                         | 91,0                                             | 10,6                         | 164,3                                           | 38,0                          |
| 8    | 0,09                                          | 35,0                      | 480,0                            | 1823,6                                                         | 53,0                                             | 15,2                         | 81,2                                            | 50,0                          |
| 9    | 0,18                                          | 25,0                      | 60,0                             | 1195,1                                                         | 135,0                                            | 8,8                          | 185,9                                           | 29,0                          |
| 10   | 0,18                                          | 25,0                      | 480,0                            | 1626,4                                                         | 71,0                                             | 12,6                         | 113,2                                           | 41,0                          |
| 11   | 0,18                                          | 35,0                      | 60,0                             | 1296,6                                                         | 115,0                                            | 9,6                          | 167,8                                           | 36,0                          |
| 12   | 0,18                                          | 35,0                      | 480,0                            | 1723,8                                                         | 57,0                                             | 13,8                         | 91,3                                            | 47,0                          |

Таблица 5. Содержание органических кислот в сброженной заварке с внесением растительных компонентов, г/кг

Table 5. Organic acids in fermented mix obtained from saccharified and thermophilic material with experimental components, g/kg

| Органическая кислота | Контроль (без добавок) | Порошок         |                          |                 |                      |
|----------------------|------------------------|-----------------|--------------------------|-----------------|----------------------|
|                      |                        | Коры дуба       | Травы эхинацеи пурпурной | Листа шалфея    | Травы полыни горькой |
| Щавелевая кислота    | $0,18 \pm 0,02$        | $0,12 \pm 0,01$ | $0,13 \pm 0,01$          | $0,04 \pm 0,01$ | $0,03 \pm 0,01$      |
| Винная кислота       | $0,40 \pm 0,03$        | $0,31 \pm 0,02$ | $0,32 \pm 0,02$          | $0,10 \pm 0,01$ | $0,10 \pm 0,01$      |
| Яблочная кислота     | $2,00 \pm 0,10$        | $0,51 \pm 0,05$ | $1,45 \pm 0,08$          | $0,06 \pm 0,01$ | $0,09 \pm 0,01$      |
| Молочная кислота     | $6,79 \pm 0,15$        | $5,21 \pm 0,12$ | $5,04 \pm 0,12$          | $3,60 \pm 0,10$ | $3,85 \pm 0,10$      |
| Уксусная кислота     | $0,20 \pm 0,02$        | $0,84 \pm 0,05$ | $0,85 \pm 0,05$          | $0,56 \pm 0,04$ | $0,40 \pm 0,03$      |
| Лимонная кислота     | $0,23 \pm 0,02$        | $0,14 \pm 0,01$ | $0,11 \pm 0,01$          | н.о.            | н.о.                 |
| Янтарная кислота     | $1,80 \pm 0,10$        | $1,14 \pm 0,06$ | $1,74 \pm 0,10$          | $0,71 \pm 0,04$ | $0,79 \pm 0,05$      |

Примечание: н.о. – не обнаружено.

Note: н.о. – not detected.

В результате обработки экспериментальных данных получены уравнения (13)–(32) для определения количества молочнокислых бактерий в сброженной заварке ( $Y_4 \times 10^6$ , КОЕ/г), их активности ( $Y_5$ , мин), кислотности заварки ( $Y_6$ , град.), количества дрожжей ( $Y_7 \times 10^6$ , КОЕ/г) и подъемной силы ( $Y_8$ , мин) от содержания различных видов нетрадиционных сырьевых компонентов, температуры и продолжительности сбраживания ржаной заварки с учетом значимых коэффициентов: при внесении порошка коры дуба применимы уравнения (13)–(17); при внесении порошка травы эхинацеи пурпурной – уравнения (18)–(22); при внесении порошка листа шалфея – уравнения (23)–(27); при внесении порошка травы полыни горькой – уравнения (28)–(32).

$$Y_4 = (983,71 + 1075,48 \times X_1 + 9,61 \times X_4 + 0,98 \times X_5 - 7876,54 \times X_1^2) \times 10^6 \quad (13)$$

$$Y_5 = 169,93 - 58,33 \times X_1 - 2,03 \times X_4 - 0,12 \times X_5 \quad (14)$$

$$Y_6 = 7,71 - 7,94 \times X_1 + 0,073 \times X_4 + 0,01 \times X_5 - 0,016 \times X_1 \times X_5 \quad (15)$$

$$Y_7 = (228,23 + 118,57 \times X_1 - 1,64 \times X_4 - 0,19 \times X_5 - 0,13 \times X_1 \times X_5) \times 10^6 \quad (16)$$

$$Y_8 = 17,73 - 45,24 \times X_1 + 0,58 \times X_4 + 0,043 \times X_5 - 0,033 \times X_1 \times X_5 - 0,00032 \times X_4 \times X_5 + 0,83 \times X_1 \times X_4 \quad (17)$$

$$Y_4 = (977,15 + 1822,57 \times X_1 + 9,62 \times X_4 + 0,99 \times X_5 - 57900,0 \times X_1^2 - 1,06 \times X_1 \times X_5) \times 10^6 \quad (18)$$

$$Y_5 = 164,77 + 42,86 \times X_1 - 1,78 \times X_4 - 0,10 \times X_5 - 0,55 \times X_1 \times X_5 \quad (19)$$

$$Y_6 = 7,29 - 7,43 \times X_1 + 0,082 \times X_4 + 0,013 \times X_5 - 840,0 \times X_1^2 \quad (20)$$

$$Y_7 = (227,16 - 264,0 \times X_1 - 1,60 \times X_4 + 0,88 \times X_1 \times X_5) \times 10^6 \quad (21)$$

$$Y_8 = 19,43 + 182,86 \times X_1 + 0,46 \times X_4 - 1,38 \times X_1 \times X_5 \quad (22)$$

$$Y_4 = (987,43 + 299,64 \times X_1 + 9,39 \times X_4 + 1,00 \times X_5 - 7086,73 \times X_1^2) \times 10^6 \quad (23)$$

$$Y_5 = 155,39 + 64,80 \times X_1 - 1,45 \times X_4 - 0,11 \times X_5 \quad (24)$$

$$Y_6 = 7,31 + 2,14 \times X_1 + 0,082 \times X_4 + 0,013 \times X_5 - 127,55 \times X_1^2 \quad (25)$$

$$Y_7 = (236,92 - 1,90 \times X_4 - 0,22 \times X_5 + 0,37 \times X_1 \times X_5) \times 10^6 \quad (26)$$

$$Y_8 = 20,32 + 0,43 \times X_4 - 0,48 \times X_1 \times X_5 \quad (27)$$

$$Y_4 = (969,43 + 12796,9 \times X_1 + 10,19 \times X_4 + 1,01 \times X_5 - 1,15 \times 10^6 \times X_1^2) \times 10^6 \quad (28)$$

$$Y_5 = 171,48 - 857,14 \times X_1 - 2,06 \times X_4 - 0,14 \times X_5 + 142578,0 \times X_1^2 \quad (29)$$

$$Y_6 = 8,0 - 47,32 \times X_1 + 0,063 \times X_4 + 0,009 \times X_5 - 0,15 \times X_1 \times X_5 \quad (30)$$

$$Y_7 = (229,83 + 2395,54 \times X_4 - 1,69 \times X_5 - 58203,1 \times X_1^2 + 1,32 \times X_1 \times X_5) \times 10^6 \quad (31)$$

$$Y_8 = 17,84 - 924,11 \times X_1 + 0,57 \times X_4 + 0,048 \times X_5 \quad (32)$$

Для всех полученных зависимостей рассчитаны коэффициенты детерминации  $R^2$ , значения которых превышают 0,95. Внесение нетрадиционных сырьевых компонентов в состав сброженной заварки на основе осахаренной и термофильной заквашенной заварки оказывает влияние не только на количественный и качественный состав культивируемых специфических микроорганизмов, но и на профиль продуктов их метаболизма. В связи с этим исследован состав органических кислот, продуцируемых микроорганизмами сброженной заварки, преимущественно молочнокислыми бактериями, при использовании порошков нетрадиционных сырьевых компонентов (табл. 5).

Анализ результатов, представленных в таблице 5, свидетельствует, что внесение нетрадиционных сырьевых компонентов влияет на спектр органических кислот, продуцируемых микроорганизмами в сброженной заварке на основе осахаренной и термофильной заквашенной заварки. В большинстве случаев содержание органических кислот снижалось при внесении нетрадиционных сырьевых компонентов, за исключением порошка травы эхинаеи пурпурной, применение которого сохраняло содержание яблочной и янтарной кислот практически на уровне контрольного образца (без добавок). Напротив, содержание уксусной кислоты возрастало при использовании всех исследуемых порошков – коры дуба, травы эхинаеи пурпурной,

листа шалфея и травы полыни горькой. Таким образом, внесение изучаемых компонентов расширяет вкусоароматический профиль сброженной заварки, полученной с использованием новых для хлебопекарной отрасли сырьевых компонентов.

Установленное в ходе экспериментов разнонаправленное изменение содержания молочной и уксусной кислот (табл. 5) отражает перестройку метаболических потоков в консорциуме микроорганизмов ржаной заварки под воздействием фитодобавок.

Для оценки достоверности различий между контрольным и опытными образцами проведен однофакторный дисперсионный анализ (ANOVA). Установлено, что снижение содержания молочной кислоты при внесении шалфея (с 6,79 до 3,60 г/кг) статистически значимо ( $p < 0,05$ ). Различия между образцами с корой дуба и эхинацей по содержанию уксусной кислоты не являются значимыми ( $p > 0,05$ ), что позволяет рассматривать эти две добавки как взаимозаменяемые в отношении формирования ароматического профиля.

Снижение концентрации молочной кислоты (с 6,79 до 3,60–5,21 г/кг) может быть обусловлено несколькими факторами. Во-первых, полифенольные соединения, содержащиеся в коре дуба, шалфее и полыни, способны ингибировать лактатдегидрогеназу – ключевой фермент гомоферментативного молочнокислого брожения у *Lactobacillus plantarum* и *L. delbrueckii*. В результате часть метаболического потока переключается с образования молочной кислоты на продукцию уксусной кислоты, этанола и  $\text{CO}_2$  (гетероферментативный путь). Во-вторых, отдельные штаммы молочнокислых бактерий в стрессовых условиях (наличие полифенолов, повышенная осмотическая активность) могут активировать альтернативные пути регенерации НАД<sup>+</sup>, что также смещает баланс в сторону накопления уксусной кислоты.

Возрастание содержания уксусной кислоты (с 0,20 до 0,40–0,85 г/кг) связано не только с переключением метаболизма самих лактобацилл, но и с активацией дрожжей *Saccharomyces cerevisiae*. В присутствии фитодобавок (особенно эхинаеи и шалфея) дрожжи усиливают продукцию этанола, который затем окисляется до уксусной кислоты либо самими дрожжами (при ограничении кислорода), либо уксуснокислыми бактериями, присутствующими в заквасочном консорциуме. Кроме того, некоторые полифенолы (например эллаговая кислота в коре дуба) могут служить дополнительными акцепторами электронов, стимулируя образование уксусной кислоты как побочного продукта.

Полученные результаты согласуются с исследованием L. Piekarska-Radzik & E. Klewicka [23], в котором полифенолы растительного происхождения ингибировали гомоферментативное молочнокислое брожение у *Lactobacillus* spp. при сохранении общей жизнеспособности клеток. Аналогичный эффект описан для экстрактов дуба и шалфея в ферментационных системах на основе ржаной муки [17].

Однако в отличие от исследования E.-S. Lim & E.-W. Lee [22], где добавление растительных экстрактов приводило к подавлению как молочной, так и уксусной кислот, в данном исследовании зафиксировано разнонаправленное изменение: снижение молочной кислоты сопровождалось ростом содержания уксусной. Это различие может быть объяснено как видовым составом заквасочной микрофлоры (наличие активных гетероферментативных штаммов и дрожжей), так и спецификой дискретного режима производства, при котором накопление метаболитов происходит на фоне частичного сохранения закваски от предыдущего цикла.

Следовательно, полученные количественные зависимости расширяют представления о роли фитодобавок как регуляторов не только роста, но и метаболической активности заквасочной микрофлоры, что имеет значение для управляемого производства заварного хлеба с заданными органолептическими свойствами.

### Выводы

Опытным путем установлено, что образцы мучных смесей как без внесения, так и с внесением нетрадиционных сырьевых компонентов, используемые для получения ржаных заварок, соответствуют действующим требованиям по показателям безопасности и характеризуются улучшенным минеральным составом.

Определены новые зависимости, отражающие взаимосвязь между показателями жизнеспособности культивируемых микроорганизмов (дрожжей и молочнокислых бактерий), их активностью в сброженной заварке на основе осахаренной и термофильной заквашенной заварки и составом питательных смесей с добавлением новых для хлебопекарной отрасли видов растительного сырья, а также технологическими параметрами приготовления сброженной заварки. Выявленные зависимости позволяют регулировать биотехнологические процессы в ржаных полуфабрикатах в дискретном режиме производства заварного хлеба.

Доказано, что использование порошков коры дуба, травы эхинацеи пурпурной, листа шалфея и травы полыни горькой позволяет расширить вкусоароматический профиль сброженной заварки, приготовленной на основе осахаренной и термофильной заквашенной заварки, что способствует улучшению потребительских свойств заварного хлеба.

В работе не исследовалось влияние фитодобавок на органолептические свойства готового хлеба (вкус, аромат, цвет мякиша), что является предметом дальнейших исследований. Также не проводилась оценка антиоксидантной активности заварок. Обнаруженное увеличение содержания уксусной кислоты в 2,0–4,3 раза

позволяет предположить повышение микробиологической устойчивости готового хлеба. Данная гипотеза также требует экспериментальной проверки в последующих исследованиях. Перспективное направление – масштабирование зависимостей для промышленных заквасочных аппаратов с автоматическим поддержанием заданных параметров ферментации.

### Критерии авторства

О. В. Чугунова – руководство проектом, методологическое сопровождение, анализ и интерпретация полученных данных. Р. Т. Тимакова – разработка концепции и дизайна исследования, общий контроль за ходом практической работы, анализ данных. А. В. Акулич – формирование общей методологии, непосредственная практическая реализация экспериментальной части, обработка и анализ данных. Т. Д. Самуйленко – выполнение практических этапов работы, первичная систематизация и подготовка данных. Е. С. Лыбенко – проведение теоретического обзора, критический анализ литературы и обработка эмпирических данных. Все авторы внесли равноценный вклад в подготовку и проведение исследования.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### Раскрытие использования ИИ

Совершенствование языка и стиля, улучшение читабельности, проверка грамматики и орфографии.

### Contribution

O.V. Chugunova supervised the project, provided the methodological support, analyzed the results, and interpreted the obtained data. R.T. Timakova developed the research concept and design, supervised the experimental work, and analyzed the results. A.V. Akulich developed the general research methodology, conducted the experiments, and processed and analysis. T.D. Samoylenko conducted the experiments, performed the initial systematization, and prepared the data. E.S. Lybenko wrote the review and processed the empirical data. All the authors made an equal contribution to the conception, design, and execution of this study.

### Conflict of interest

The authors state that there is no conflict of interest.

### Declaration of generative AI

The authors used AI to improve language and style, improve readability, and check grammar and spelling.

### Список литературы / References

1. Кандроков Р. Х., Фирсанова А. Р., Суворов О. А. Технология хлебобулочных изделий в виде бриоши из пшенично-льняно-рыжиковой муки. Индустрия питания. 2025. Т. 10. № 2. С. 15–23. [Kandrokova RKh, Firsanova AR,



- Suvorov OA. Technology of bakery products in the form of brioche made from wheat, flax, and camelina flour. Food Industry. 2025;10(2):15–23. (In Russ.)] <https://doi.org/10.29141/2500-1922-2025-10-2-22>
2. Резниченко И. Ю., Мирошина Т. А. Оценка замены пшеничной муки на безглютеновую композицию в технологии печенья. Индустрия питания. 2025. Т. 10. № 3. С. 35–42. [Reznichenko IYu, Miroshina TA. Evaluation of the replacement of wheat flour with a gluten-free composition in the technology of cookies. Food Industry. 2025;10(3):35–42. (In Russ.)] <https://doi.org/10.29141/2500-1922-2025-10-3-4>
3. Кандроков Р. Х., Юрченко Т. И., Румянцева В. В. Разработка технологии хлебобулочных изделий с использованием цельнозерновой полбяной муки. Техника и технология пищевых производств. 2024. № 3. С. 598–609. [Kandrokov RKH, Yurchenko TI, Rumyantseva VV. Development of technology for bakery products using whole-grain spelt flour. Food Processing: Techniques and Technology. 2024;(3):598–609. (In Russ.)] <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-3-2529>
4. Ладнова О. Л., Корячкина С. Я., Корячкин В. П., Большакова Л. С. Разработка технологии функциональных хлебобулочных изделий. Техника и технология пищевых производств. 2023. № 3. С. 576–590. [Ladnova OL, Koryachkina SYa, Koryachkin VP, Bolshakova LS. Development of technology for functional bakery products. Food Processing: Techniques and Technology. 2023;(3):576–590. (In Russ.)] <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2023-3-245>
5. Marek A, Stachowiak B, Kapusta I. Comparison of the antioxidant and sensorial properties of kvass produced from mountain rye bread with the addition of selected plant raw materials. Foods. 2024;13(3). <https://doi.org/10.3390/foods13030357>
6. Garcia-Llatas G, Barberá R, Faubel N. Oral phase coupled with *in vitro* dynamic gastrointestinal digestion for assessment of plant sterol bioaccessibility from wholemeal rye bread. Journal of Agricultural and Food Chemistry. 2024;72(28):15672–15679. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.4c02109>
7. Landberg R, Jonsson K, Iversen N. The effect of rye-based foods on postprandial plasma insulin concentration: The rye factor. Frontiers in Nutrition. 2022;9. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.868938>
8. Dicksved J, Landberg R, Fristedt R. The effects of high fiber rye, compared to refined wheat, on gut microbiota composition, plasma short chain fatty acids, and implications for weight loss and metabolic risk factors (the RyeWeight study). Nutrients. 2022;14(8):1669–1669. <https://doi.org/10.3390/nu14081669>
9. Salvi D, Vincenzo S, Raffaella B. Functional foods and nutraceuticals in irritable bowel syndrome. Journal of Clinical Medicine. 2025;14(6):1830. <https://doi.org/10.3390/jcm14061830>
10. Rosnita T, Capozzi V, Teixeira A. Sourdough microbiome comparison and benefits. Microorganisms. 2021;9(7):1355. <https://doi.org/10.3390/microorganisms9071355>
11. Dertli E, Hasan C, Fereshteh F. Exploring the nutritional impact of sourdough fermentation: Its mechanisms and functional potential. Foods. 2024;13(11). <https://doi.org/10.3390/foods13111732>
12. Камартинова Д. Р., Китаевская С. В., Решетник О. А. Перспективы применения заквасок молочнокислых бактерий в технологии зернового хлеба из полбы. Индустрия питания. 2025. Т. 10. № 2. С. 46–56. [Kamardinova DR, Kitaevskaya SV, Reshetnik OA. Prospects for the use of lactic acid bacteria starter cultures in the technology of spelt grain bread. Food Industry. 2025;10(2):46–56. (In Russ.)] <https://doi.org/10.29141/2500-1922-2025-10-2-5>
13. Savvaidis I, Saubenova M, Oleinikova Y. Sourdough microbiota for improving bread preservation and safety: Main directions and new strategies. Foods. 2025;14(14). <https://doi.org/10.3390/foods14142443>
14. Самуйленко Т. Д., Акулич А. В. Исследование процесса сбраживания жидкой ржаной заварки и определение технологических параметров для дискретного режима производства заварных сортов хлеба. Health, Food & Biotechnology. 2022. Т. 4. № 4. [Samuylenko TD, Akulich AV. Research of the fermentation process of liquid rye brew and determination of technological parameters for the discrete mode of production of brewed bread varieties. Health, Food & Biotechnology. 2022;4(4). (In Russ.)] <https://doi.org/10.36107/hfb.2022.i4.s142>
15. Murniece R. Scald fermentation time as a factor determining the nutritional and sensory quality of rye bread. Foods. 2025;14(6):979. <https://doi.org/10.3390/foods14060979>
16. Жаркова И. М., Росляков Ю. Ф., Иванчиков Д. С. Закваски спонтанного (естественного) брожения: особенности технологии и роль в современном хлебопекарном производстве. Техника и технология пищевых производств. 2023. № 3. С. 525–544. [Zharkova IM, Roslyakov YuF, Ivanchikov DS. Starters of spontaneous (natural) fermentation: Features of technology and role in modern bakery production. Food Processing: Techniques and Technology. 2023;(3):525–544. (In Russ.)] <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2023-3-2455>
17. Кишилова С. А., Леонова В. А., Митрова В. А., Рожнова 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. № 3. С. 624–633. [Kishilova SA, Leonova VA, Mitrova VA, Rozhnova IV. Modern biotechnological solutions in the field of using lactic acid bacteria for the dairy industry: From strain selection to probiotic products. Food Processing: Techniques and Technology. 2025;(3):624–633. (In Russ.)] <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2025-3-2596>
18. Чугунова О. В., Заворохина Н. В. Перспективы создания пищевых продуктов с заданными свойствами, повышающих качество жизни населения. Известия Уральского государственного экономического университета. 2014. № 5. С. 120–125. [Chugunova OV, Zavorokhina NV. Prospects for creating food products with predetermined properties that improve the quality of life. Journal of the Ural State University of Economics. 2014;5:120–125. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/SYRRLR>

19. Сухих С. А., Иванова С. А., Бахтиярова А. Х., Пшеничников С. Е., Левада Е. В. и др. Цитотоксические, антиоксидантные и антибактериальные свойства экстрактов растений Восточной Прибалтики. Техника и технология пищевых производств. 2025. Т. 55. № 4. С. 903–917. [Sukhikh SA, Ivanova SA, Bakhtiyarova AKh, Pshenichnikov SE, Levada KV, *et al.* Cytotoxic, antioxidant, and antibacterial properties of eastern baltic plant extracts. Food Processing: Techniques and Technology. 2025;55(4):903–917. (In Russ.)] <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2025-4-2615>
20. Люц В. А., Харлов С. Ю., Величкович Н. С., Проскурякова Л. А., Остапова Е. В. и др. Антимикробные свойства экстрактов *Pulmonaria officinalis*, *Heracleum sibiricum*, *Syringa vulgaris*, произрастающих в Сибири. Техника и технология пищевых производств. 2025. Т. 55. № 3. С. 673–686. [Lutz VA, Harlov SYu, Velichkovich NS, Proskuryakova LA, Ostapova EV, *et al.* Antimicrobial properties of siberian wild plant extracts: *Pulmonaria officinalis*, *Heracleum sibiricum*, and *Syringa vulgaris*. Food Processing: Techniques and Technology. 2025;55(3):673–686. (In Russ.)] <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2025-3-2597>
21. Velichkovich NS, Dunchenko NI, Stepanova AA, Kozlova OV, Faskhutdinova ER, *et al.* Control of rye scolding microflora in discrete bread production. Foods and Raw Materials. 2025;13(2):219–232. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2025-2-649>
22. Lim E-S, Lee E-W. Quality characteristics of rye sourdough fermented with a mixed culture of probiotic lactic acid bacteria and yeast exhibiting potent antioxidant properties. Food Science and Preservation. 2025;32(2):232–245. <https://doi.org/10.11002/fsp.2025.32.2.232>
23. Piekarska-Radzik L, Klewicka E. Mutual influence of polyphenols and *Lactobacillus* spp. bacteria in food: A review. European Food Research and Technology. 2021;247:9–24. <https://doi.org/10.1007/s00217-020-03603-y>
24. Ștefănescu R, Ciurea CN, Mare AD, Man A, Nisca A, *et al.* *Quercus robur* older bark – a source of polyphenolic extracts with biological activities. Applied Sciences. 2022;12(22):11738. <https://doi.org/10.3390/app122211738>
25. Ozturk T, Ávila-Gálvez MÁ, Mercier Sylvie, Vallejo F. Impact of lactic acid bacteria fermentation on (poly) phenolic profile and *in vitro* antioxidant and anti-inflammatory properties of herbal infusions. Antioxidants. 2024;13(5):562. <https://doi.org/10.3390/antiox13050562>
26. Stanisavljević I, Stojičević S, Veličković D, Veljković V, Lazić M. Antioxidant and antimicrobial activities of Echinacea (*Echinacea purpurea* L.) extracts obtained by classical and ultrasound extraction. Chinese Journal of Chemical Engineering. 2009;17(3):478–483. [https://doi.org/10.1016/S1004-9541\(08\)60234-7](https://doi.org/10.1016/S1004-9541(08)60234-7)
27. Rossi L, Gabriele R, Lucini L, Rebecchi A. Antimicrobial potential of polyphenols: Mechanisms of action and microbial response – a narrative review. Antioxidants. 2025;14(2):200. <https://doi.org/10.3390/antiox14020200>
28. Yazgan H. Investigation of antimicrobial properties of sage essential oil and its nanoemulsion as antimicrobial agent. LWT. 2020;130:109669. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109669>
29. Timakova R, Akulich A, Samuilenko T. The role of biotechnology in ensuring the preservation of dry composite mixtures. E3s Web of Conferences. 2021;254:10018. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202125410018>

#### Дополнительная информация об авторах / Additional information about the authors

Чугунова Ольга Викторовна / Olga V. Chugunova ORCID 0000-0002-7039-4047; eLIBRARY SPIN 7452-2380  
Тимакова Роза Темерьяновна / Roza T. Timakova ORCID 0000-0002-4777-1465; eLIBRARY SPIN 7663-1784  
Акулич Александр Васильевич / Alexander V. Akulich ORCID 0000-0001-5973-6969; eLIBRARY SPIN 2594-6981  
Самуйленко Татьяна Дмитриевна / Tatyana D. Samuilenko ORCID 0000-0002-9649-9816  
Лыбенко Елена Сергеевна / Elena S. Lybenko ORCID 0000-0001-8853-1903; eLIBRARY SPIN 3688-0476

<https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-3-2656>  
<https://elibrary.ru/CXHSQZ>

Оригинальная статья  
<https://fptt.ru>

## Оценка антагонистических свойств представителей рода *Pantoea* в отношении фитопатогенов сельскохозяйственных культур



Е. Р. Фасхутдинова<sup>1,\*</sup>, Ю. Е. Афонина<sup>1</sup>,  
А. А. Шевель<sup>1</sup>, В. С. Евдокимов<sup>2</sup>, Н. А. Нешумаева<sup>3</sup>,  
Л. М. Аксенова<sup>4</sup>, А. М. Федорова<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Кемеровский государственный университет<sup>ROR</sup>, Кемерово, Россия

<sup>2</sup> ООО «Азот-Агро», Кемерово, Россия

<sup>3</sup> Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук<sup>ROR</sup>, Красноярск, Россия

<sup>4</sup> Всероссийский научно-исследовательский институт кондитерской промышленности<sup>ROR</sup>, Москва, Россия

Поступила в редакцию: 01.06.2026

Принята после рецензирования: 10.08.2026

Принята к публикации: 01.09.2026

\*e-mail: faskhutdinovae.98@mail.ru

© Е. Р. Фасхутдинова, Ю. Е. Афонина, А. А. Шевель,  
В. С. Евдокимов, Н. А. Нешумаева, Л. М. Аксенова,  
А. М. Федорова, 2026



### Аннотация.

Грибы рода *Fusarium* выступают основными возбудителями заболеваний злаковых культур, продуцируя фито- и микотоксины, снижающие урожайность и качество зерна. В связи с этим актуальным направлением является поиск эффективных агентов биологического контроля среди растительно-ассоциированных бактерий. Цель исследования – оценить антагонистическую и ростостимулирующую активность штаммов *Pantoea agglomerans* B-14726, *P. vagans* B-14727 и *P. pleuroti* B-14756 в отношении фитопатогенных грибов рода *Fusarium* и их способность снижать токсическое воздействие патогенов на злаковые культуры.

Объекты исследования – штаммы бактерий, депонированные в Национальном биоресурсном центре Всероссийской коллекции промышленных микроорганизмов НИЦ «Курчатовский институт» (Москва, Россия): *P. agglomerans* B-14726, *P. vagans* B-14727 и *P. pleuroti* B-14756. Антагонистическую активность оценивали в отношении *Fusarium culmorum*, *F. poae*, а также штамма, идентифицированного как представитель *F. tricinctum* species complex. Анализ проводили методом лунок и совместного культивирования; оценивали антагонистическую активность летучих органических соединений. Также изучено влияние штаммов *Pantoea* на прорастание семян при инфицировании фитопатогенами.

Установлено, что все исследуемые штаммы проявили антагонистическую активность в отношении фитопатогенов рода *Fusarium*. Выраженную эффективность показал штамм *P. vagans* B-14727, обеспечивший максимальное подавление роста представителя комплекса видов *F. tricinctum* при совместном культивировании (68,8 %) и максимальные зоны ингибирования методом лунок (до 6,0 см). Штамм *P. agglomerans* B-14726 характеризовался стабильной антифунгальной активностью и эффективным подавлением роста фитопатогенов летучими метаболитами. *P. pleuroti* B-14756 проявил выраженный защитный эффект при совместном культивировании и способствовал повышению всхожести семян в условиях заражения. Наиболее чувствительным фитопатогеном оказался представитель *F. tricinctum*, наименее чувствительным – *F. culmorum*.

Изученные штаммы рода *Pantoea* обладают выраженным биоконтрольным и ростостимулирующим потенциалом и могут рассматриваться в качестве перспективной основы биологических препаратов для защиты злаковых культур от фузариозной инфекции.

**Ключевые слова.** Антагонистическая активность, фитопатогенные грибы, ростостимулирующие бактерии, летучие органические соединения, ризобактерии, устойчивость растений, злаковые культуры

**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:** Фасхутдинова Е. Р., Афонина Ю. Е., Шевель А. А., Евдокимов В. С., Нешумаева Н. А. и др. Оценка антагонистических свойств представителей рода *Pantoea* в отношении фитопатогенов сельскохозяйственных культур. Техника и технология пищевых производств. 2026. Т. 56. № 3. С. 504–515. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-3-2656>

## Antagonistic Properties of *Pantoea* against Crop Phytopathogens



Elizaveta R. Faskhutdinova<sup>1,\*</sup>, Yulia E. Afonina<sup>1</sup>,  
Arina A. Shevel<sup>1</sup>, Vitaly S. Evdokimov<sup>2</sup>, Nadezhda A. Neshumaeva<sup>3</sup>,  
Larisa M. Aksenova<sup>4</sup>, Anastasiya M. Fedorova<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Kemerovo State University<sup>ROR</sup>, Kemerovo, Russia

<sup>2</sup> Azot-Agro Ltd, Kemerovo, Russia

<sup>3</sup> Krasnoyarsk Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences<sup>ROR</sup>, Krasnoyarsk, Russia

<sup>4</sup> All-Russian Scientific Research Institute of Confectionery Industry<sup>ROR</sup>, Moscow, Russia

Received: 01.06.2026

Revised: 10.08.2026

Accepted: 01.09.2026

\*e-mail: [faskhutdinovae.98@mail.ru](mailto:faskhutdinovae.98@mail.ru)

© E.R. Faskhutdinova, Yu.E. Afonina, A.A. Shevel, V.S. Evdokimov,  
N.A. Neshumaeva, L.M. Aksenova, A.M. Fedorova, 2026



### Abstract.

*Fusarium* fungi are among the most prevalent pathogens of cereal crops, producing phyto- and mycotoxins that severely reduce grain yield and quality. Developing novel, effective biocontrol agents is a pressing agricultural priority, and plant-associated bacteria offer a promising solution. This article evaluates the antagonistic and growth-promoting activities of *Pantoea* strains against phytopathogenic *Fusarium* species, as well as their capacity to mitigate pathogen-induced toxic effects on cereal crops.

The strains *Pantoea agglomerans* B-14726, *P. vagans* B-14727, and *P. pleuroti* B-14756 were obtained from the National Bioresource Center of the All-Russian Collection of Industrial Microorganisms at the Kurchatov Institute (Moscow, Russia). Their antagonistic activity was assessed against *Fusarium culmorum*, *F. poae*, and a strain belonging to the *F. tricinctum* species complex using well diffusion and co-cultivation methods. The study also evaluated the antifungal activity of volatile organic compounds and the effect of *Pantoea* strains on seed germination under phytopathogenic pressure.

All tested strains exhibited distinct antagonistic activity against the phytopathogens. *P. vagans* B-14727 demonstrated the highest efficacy, achieving maximum growth suppression of the *F. tricinctum* species complex during co-cultivation (68.8%) and producing the largest zones of inhibition ( $\leq 6.0$  cm). *P. agglomerans* B-14726 showed stable antifungal activity and effective pathogen growth suppression via volatile metabolites. Meanwhile, *P. pleuroti* B-14756 exhibited a robust protective effect during co-cultivation and significantly enhanced seed germination under infestation conditions. Across all tests, the *F. tricinctum* complex proved to be the most sensitive pathogen, whereas *F. culmorum* was the most resistant.

In conclusion, these *Pantoea* strains possess reliable biocontrol and growth-promoting potential, making them promising candidates for developing commercial bioproducts to protect cereal crops against *Fusarium* infections.

**Keywords.** Antagonistic activity, phytopathogenic fungi, growth-promoting bacteria, volatile organic compounds, rhizobacteria, plant resistance, cereal crops

**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:** Faskhutdinova ER, Afonina YuE, Shevel AA, Evdokimov VS, Neshumaeva NA, *et al.* Antagonistic Properties of *Pantoea* against Crop Phytopathogens. 2026;56(3):504–515. (In Russ.) <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-3-2656>

### Введение

Грибы рода *Fusarium* относятся к числу наиболее распространенных и экономически значимых фитопатогенов сельскохозяйственных культур [1]. Их представители вызывают широкий спектр заболеваний растений, включая фузариоз колоса, корневые и стеблевые гнили, а также гниль проростков. Зачастую возбудителями фузариоза колоса выступают *F. graminearum*, *F. culmorum*, *F. poae*, *F. tricinctum* [2–6]. Распростра-

нение отдельных видов зависит от климатических условий, агротехнических факторов и восприимчивости растений-хозяев. Для более теплых и влажных регионов характерно доминирование *F. graminearum* [3], тогда как в умеренном и прохладном климате преобладают *F. culmorum*, *F. poae* и *F. tricinctum* [7].

Особую опасность род *Fusarium* представляет из-за способности продуцировать широкий спектр микотоксинов, загрязняющих зерно и продукты его



переработки [8]. Преимущественно распространены трихотецены типов А и В, в т. ч. дезоксиниваленол, ниваленол, токсины Т-2 и НТ-2, а также зеараленон, эниатины и боверицин [9–13]. Эти соединения обладают токсическим действием на растения, животных и человека, нарушают синтез белка, ингибируют клеточный метаболизм и способны вызывать острые и хронические микотоксикозы [14–17]. Загрязнение зерна микотоксинами приводит к значительным экономическим потерям из-за ограничения использования зараженного зерна в пищевых и кормовых целях [18].

Одним из наиболее опасных представителей рода является *F. culmorum* – гембиотрофный фитопатоген, вызывающий корневую гниль и фузариозное поражение колоса у пшеницы и других злаковых культур [19]. Для этого вида характерна короткая биотрофная стадия, сменяющаяся некротрофным типом паразитизма [20]. Симптомы заболевания проявляются в виде загнивания проростков, побурения корней и прикорневой зоны, а также формирования так называемых «белых колосьев». Кроме того, *F. culmorum* – активный продуцент дезоксиниваленола, зеараленона и ниваленола. В Российской Федерации данный фитопатоген не относится к доминирующим возбудителям фузариозных заболеваний и встречается реже, чем другие представители рода *Fusarium*. Тем не менее при благоприятных для развития инфекции условиях *F. culmorum* существенно снижает урожайность и качество зерна [21].

*F. tricinctum* входит в комплекс близкородственных видов (*F. tricinctum* species complex) и может участвовать в развитии фузариозных заболеваний злаковых культур [22]. Представители этого комплекса преимущественно распространены в регионах с умеренным и прохладным климатом, однако частота их выявления и хозяйственная значимость зависят от географических и погодных условий [23]. Помимо способности вызывать фузариоз колоса и снижение урожайности злаковых культур, *F. tricinctum* продуцирует микотоксины, в т. ч. эниатины, монилиформины и токсины Т-2 [24, 25]. Исследования показывают, что данный вид активно колонизирует листья и колосья пшеницы, формируя большое количество конидий и вызывая увядание растений [25]. Взаимодействия между различными видами *Fusarium* могут приводить к изменению уровня продукции микотоксинов и усилению патогенности в условиях совместного инфицирования [26].

В связи с высокой вредоносностью фузариозных заболеваний все большее внимание уделяется разработке экологически безопасных методов биологического контроля фитопатогенов [27]. Биологический контроль с использованием антагонистических микроорганизмов рассматривается как перспективная альтернатива химическим фунгицидам. На сегодняшний день описано более 30 видов микроорганизмов, которые могут ингибировать рост *F. graminearum* и других

представителей рода *Fusarium*, а также снижать уровень накопления микотоксинов в зерне [28]. Основные механизмы биологического контроля – продуцирование метаболитов с антимикробными свойствами, конкуренция за питательные вещества и экологические ниши, синтез сидерофоров, разрушение клеточной стенки фитопатогена литическими ферментами, а также индукция системной устойчивости растений [29, 30].

Среди перспективных агентов биологического контроля особый интерес представляют бактерии рода *Pantoea*, включающего широкий спектр растительно-ассоциированных микроорганизмов, встречающихся в ризосфере, филлосфере, семенах и внутренних тканях растений [31, 32]. *Pantoea* отличаются высокой экологической пластичностью, эффективно колонизируют поверхности растений и продуцируют разнообразные биологически активные соединения. Наиболее изученными видами являются *P. vagans* и *P. agglomerans*, обладающие выраженными антимикробными и ростостимулирующими свойствами [33, 34]. Вместе с тем представители рода характеризуются значительным внутривидовым разнообразием: наряду с ростостимулирующими встречаются фитопатогенные и условно-патогенные штаммы.

*P. agglomerans* относится к числу перспективных ризосферных и эндофитных бактерий, оказывающих комплексное положительное влияние на рост и развитие растений [35, 36]. Штаммы *P. agglomerans* принадлежат к семейству *Erwiniaceae* и определяются как грамотрицательные факультативно-анаэробные палочковидные бактерии, колонизирующие ризосферу и внутренние ткани растений. Установлено, что *P. agglomerans* обладает широким набором механизмов стимуляции роста растений, среди которых синтез фитогормонов, растворение труднорастворимых соединений фосфора, фиксация атмосферного азота и подавление развития фитопатогенных микроорганизмов [37].

Одним из важнейших механизмов положительного воздействия *P. agglomerans* является продуцирование фитогормонов, прежде всего индолил-3-уксусной кислоты и гиббереллинов, регулирующих клеточное деление и растяжение, развитие корневой системы и формирование надземных органов растений [38].

Бактерии повышают доступность элементов минерального питания за счет мобилизации фосфатов и фиксации атмосферного азота, что улучшает минеральное питание растений и повышает их продуктивность. Важное значение имеет также синтез *P. agglomerans* антимикробных соединений, обеспечивающих защиту растений от фитопатогенов и снижающих риск развития заболеваний [39].

В последние годы особое внимание уделяется изучению роли *P. agglomerans* в формировании и функционировании ризосферных микробных сообществ. Выявлено, что данные бактерии эффективно колонизируют корневую систему растений и образуют

устойчивые биопленки, поддерживающие длительное взаимодействие с растением-хозяином. Благодаря этому улучшается адаптация растений к неблагоприятным условиям среды, в т. ч. к засолению, дефициту влаги и другим абиотическим стрессам. Исследования показывают, что инокуляция растений штаммами *P. agglomerans* способствует повышению фотосинтетической активности, усилению антиоксидантной защиты, улучшению физико-химических свойств почвы и увеличению активности почвенных гидролитических ферментов [40].

Таким образом, *P. agglomerans* представляет значительный интерес как объект сельскохозяйственной биотехнологии за счет сочетания ростостимулирующих, адаптогенных и биоконтрольных свойств. Комплекс механизмов взаимодействия с растениями позволяет рассматривать безопасные штаммы данного вида в качестве перспективной основы для разработки микробных препаратов, направленных на повышение продуктивности сельскохозяйственных культур и их устойчивости к биотическим и абиотическим стрессовым факторам [41].

Бактерия *P. pleuroti* (штамм В-14756) – грамотрицательный микроорганизм, обладающий большим потенциалом как агент биологического контроля и стимулятора роста злаковых культур. В рамках защиты растений от биотического стресса штамм проявляет выраженную антагонистическую активность в отношении широкого спектра фитопатогенных грибов, включая представителей родов *Fusarium* и *Bipolaris*. Особенностью биологического действия *P. pleuroti* является преобладание механизмов непосредственного взаимодействия с патогеном над диффузией метаболитов в среду. Помимо антифунгальных свойств, штамм характеризуется выраженной PGPB-активностью, обусловленной способностью к синтезу индольных соединений, что обеспечивает интенсификацию развития корневой системы и увеличение вегетативной массы растений. Сочетание антагонистических и ростостимулирующих свойств делает *P. pleuroti* перспективным компонентом биопрепаратов для повышения устойчивости и продуктивности злаковых агроценозов в условиях биотического вызова [41, 42].

Таким образом, анализ литературных данных свидетельствует о высокой перспективности представителей рода *Pantoea* в качестве агентов биологического контроля фитопатогенных грибов рода *Fusarium*. Комплексное действие, включающее продукцию антибиотических и летучих метаболитов, синтез сидерофоров, конкуренцию за экологические ниши и индукцию системной устойчивости растений, определяет высокий потенциал данных микроорганизмов для разработки экологически безопасных технологий защиты сельскохозяйственных культур.

Цель исследования – оценить антагонистическую и ростостимулирующую активность штаммов *P. agglomerans* В-14726, *P. vagans* В-14727 и *P. pleuroti*

В-14756 в отношении фитопатогенных грибов рода *Fusarium* и их способность снижать токсическое воздействие патогенов на злаковые культуры.

### Объекты и методы исследования

Объекты исследования – штаммы бактерий, выделенные на начальном этапе работы<sup>1</sup> [43] и депонированные в Национальном биоресурсном центре Всероссийской коллекции промышленных микроорганизмов НИЦ «Курчатовский институт» (Москва, Россия): *Pantoea agglomerans* В-14726, *P. vagans* В-14727 и *P. pleuroti* В-14756. Штаммы характеризуются идентичными культурально-морфологическими свойствами: это грамотрицательные палочки, которые при росте на агаризованной среде образуют желтые округлые колонии с гладким краем и блестящей ровной поверхностью.

Изучаемые штаммы обладают выраженными ростостимулирующими свойствами, включающими способность к фиксации атмосферного азота, мобилизации труднорастворимых фосфатов, а также к синтезу фитогормонов – индолил-3-уксусной и гиббереллиновой кислот. Кроме того, они проявляют высокую антагонистическую активность в отношении фитопатогенных грибов *Fusarium graminearum* F-877, *Bipolaris sorokiniana* F-529 и *Botrytis cinerea* F-1006<sup>2</sup> [43].

Для проведения анализов готовили суспензию исследуемых штаммов на пептонной воде до достижения оптической плотности 0,8–1,0 ед. по шкале МакФарланда. Полученный инокулюм в объеме 1 мл вносили в 10 мл бульона Луриа-Бертани в модификации Миллера и культивировали 24 ч при температуре  $28 \pm 2$  °C на орбитальном шейкере со скоростью 110 об/мин. По окончании инкубации бактериальные клетки отделяли от культуральной жидкости центрифугированием при 8000 об/мин в течение 10 мин. Для дальнейшего анализа использовали надосадочную жидкость, свободную от клеток микроорганизмов [43].

Антагонистическую активность исследовали в отношении: *F. culmorum* (W. G. Smith), Sacc.; *F. poae* (C. H. Peck) Wollenw. и штамма, который относится к *F. tricinctum* species complex (*F. tricinctum*). Выделение штаммов грибов *Fusarium* из семенного материала злаковых культур, выращенных на территории Красноярского края (Россия), проводили в соответствии с методикой, принятой в лаборатории микологии и фитопатологии ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт защиты растений» (Санкт-Петербург, Россия)<sup>3</sup>. Таксономическую принадлежность выделенных изолятов определяли на основе комплекса макро- и микроморфологических характеристик, следуя методике [44].

<sup>1</sup> Фотина Н. В. Биотехнология получения биопрепарата на основе новых штаммов ризобактерий: дис. ... канд. биол. наук: 4.3.5. Кеморо, 2026. 174 с.

<sup>2</sup> Там же.

<sup>3</sup> Гагкаева Т. Ю., Гаврилова О. П., Левитин М. М., Новожилов К. В. Фузариоз зерновых культур. М.: ВИЗР; 2011. 140 с.

Антагонистическую активность штаммов оценивали методами лунок [43], совместного культивирования [45] и воздействия летучих органических соединений [46].

Согласно методу лунок, тест-культуры предварительно выращивали на картофельно-глюкозном агаре («Диа-М», Россия) в соответствии с методиками микологического культивирования. В чашках Петри с агаризованной средой, засеянной фитопатогенными микроорганизмами, вырезали лунки диаметром 6 мм и вносили в них по 300 мкл бесклеточной культуральной жидкости исследуемого штамма. Чашки инкубировали при температуре  $26 \pm 2$  °C в течение 5 суток, после чего измеряли зону подавления роста фитопатогена вокруг лунки [43].

При использовании метода совместного культивирования для опыта применяли чашки Петри с картофельно-глюкозным агаром. На одной половине чашки бактериальную культуру высевали прямым штрихом по поверхности среды, а на расстоянии 4 см от него помещали агаровый блок с мицелием фитопатогенного гриба. Посевы инкубировали при температуре  $26 \pm 2$  °C в течение 5 суток. По окончании культивирования антагонистическую активность оценивали по характеру роста мицелия гриба в направлении бактериального штриха и степени ингибирования его развития относительно контрольного варианта (без бактериальной культуры) [45].

Для оценки ингибирования летучими органическими соединениями использовали метод совместного культивирования в двухсекционных чашках Петри по методике W. Li et al. [46] в модификации. В одну секцию вносили картофельно-глюкозный агар, далее в ее центр помещали агаровый блок с активно растущим мицелием фитопатогенного гриба. Во вторую секцию вносили агаризованную среду Лурия-Бертани в модификации Миллера, на поверхность которой исследуемый бактериальный штамм высевали плотным штрихом. После инокуляции обеих секций чашки герметизировали парафильмом для накопления летучих метаболитов бактерий в замкнутом пространстве. Культивирование проводили при температуре  $26 \pm 2$  °C в течение 5 суток. Антагонистическую активность оценивали по степени подавления роста мицелия фитопатогенного гриба под воздействием летучих органических соединений бактериального происхождения. В качестве показателя использовали диаметр колонии гриба, который сравнивали с контрольным вариантом.

На следующем этапе исследования выявляли способность бактерий рода *Pantoea* снижать токсическое действие фитопатогенов на пшеницу (*Triticum aestivum* L.). Для этого семена стерилизовали 5 % раствором гипохлорита натрия (10 мин) с последующей пятикратной промывкой стерильной дистиллированной водой и подсушиванием в асептических условиях в течение 2 ч<sup>4</sup> [43].

Для создания инфекционного фона использовали суспензию фитопатогена с концентрацией, составляющей  $2,5 \times 10^5$  спор/мл, полученную смывом мицелия и спор с семисуточной культуры, выращенной на скошенном агаре при  $26 \pm 2$  °C. Семена инокулировали в этой суспензии в течение 2 ч, затем после подсушивания обрабатывали бактериальными изолятами из расчета 2 л/т. Обработанные семена помещали в чашках Петри на увлажненных фильтровальных дисках и инкубировали в климатической камере KBWF 720 (Binder, Германия) при температуре  $25 \pm 2$  °C и влажности 40 % в течение 7 суток. В качестве контроля использовали семена, не обработанные ни фитопатогенами, ни консорциумом [47]. Все эксперименты проводили в трехкратной повторности.

### Результаты и их обсуждение

Результаты определения антагонистической активности штаммов *Pantoea* в отношении фитопатогенов методами лунок, совместного культивирования и подавления летучими органическими соединениями представлены на рисунках 1–3 и в таблице 1.

Сравнительный анализ антагонистической активности исследуемых штаммов рода *Pantoea* выявил различия в спектре и выраженности подавления фитопатогенных грибов в зависимости от штамма бактерии, вида фитопатогена и условий проведения эксперимента [48, 49].

По методу лунок наиболее выраженные ингибирующие свойства проявил штамм *P. vagans* B-14727. Максимальная зона ингибирования отмечена к *F. tricinctum* – 6,0 см. Для *F. poae* и *F. culmorum* этот показатель составил 4,8 и 3,5 см соответственно. По сравнению с *P. agglomerans* B-14726 активность *P. vagans* B-14727 выше в 1,4–2,4 раза: в отношении *F. poae* – 4,8 против 2,5 см, *F. culmorum* – 3,5 против 2,4 см. Высокая антагонистическая активность *P. vagans* соотносится с имеющимися литературными данными о способности представителей данного вида продуцировать антибиотики пантоцин, гербиколин и псенаназин-подобные соединения, подавляющие рост фитопатогенов [50].

Штамм *P. agglomerans* B-14726 при использовании метода лунок проявлял умеренную активность только к *F. culmorum* и *F. poae* с зонами ингибирования 2,4 и 2,5 см соответственно. Однако при совместном культивировании эффективность штамма значительно возрастала. Максимальный уровень ингибирования касательно *F. tricinctum* достиг 63,3 %, что на 5,5 % ниже, чем у *P. vagans* B-14727 (68,8 %).

Полученные результаты согласуются с литературными данными о высокой антагонистической активности *P. agglomerans* к фитопатогенным микромицетам. Показано, что данный вид эффективно подавляет рост грибов родов *Penicillium*, *Alternaria*, *Curvularia* и *Fusarium*. В частности, в случае с *Fusarium* наблюдалось уменьшение радиуса роста колоний фитопатогена

<sup>4</sup> Гагкаева Т. Ю. ...



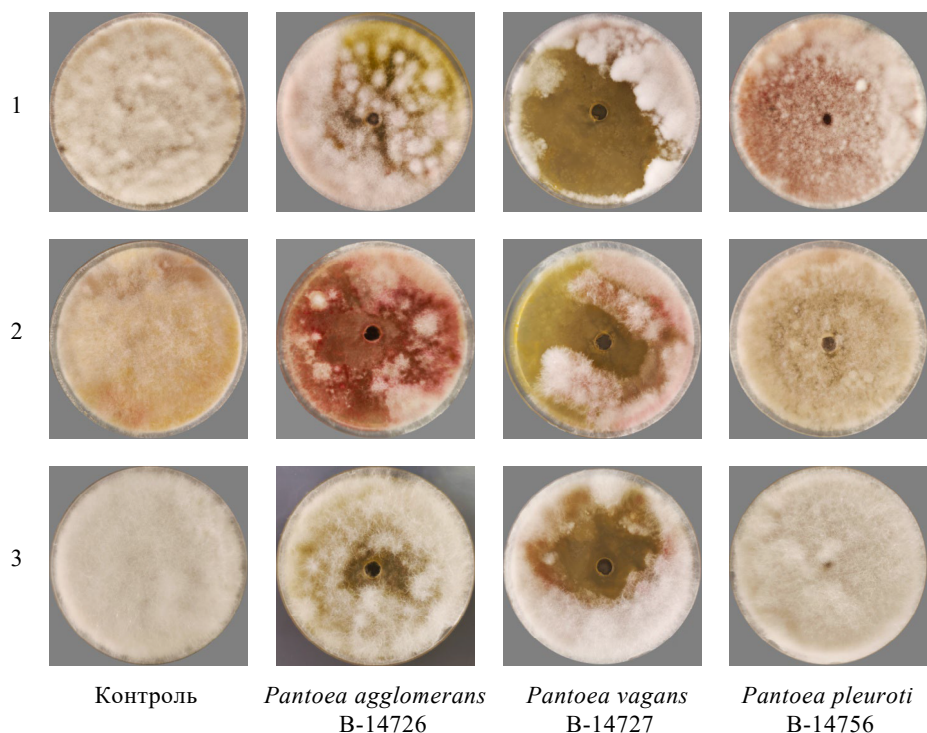


Рисунок 1. Антагонистическая активность штаммов *Pantoea* (методом лунок) в отношении фитопатогенов: 1 – *Fusarium tricinctum*; 2 – *Fusarium culmorum*; 3 – *Fusarium poae*

Figure 1. Antipathogenic activity of *Pantoea* strains (well diffusion): 1 – *Fusarium tricinctum*; 2 – *Fusarium culmorum*; and 3 – *Fusarium poae*

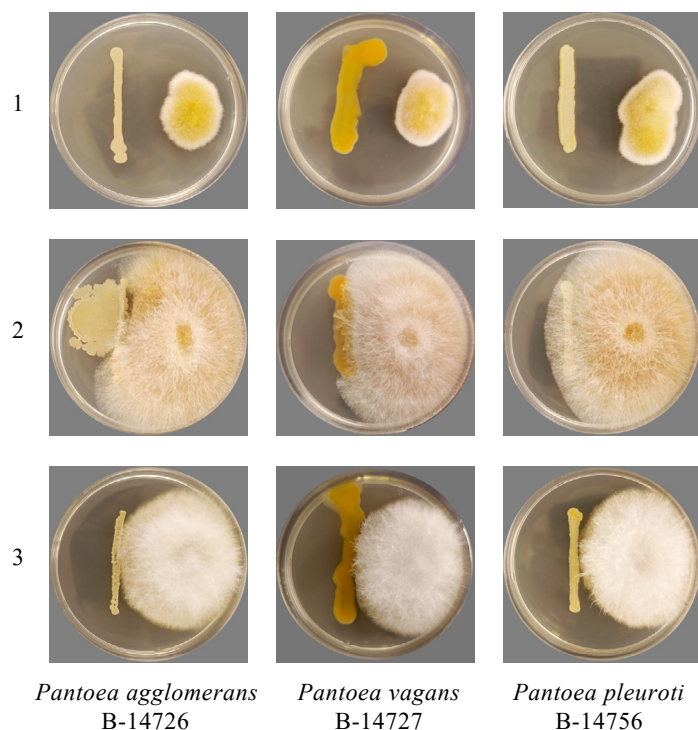


Рисунок 2. Антагонистическая активность штаммов *Pantoea* (методом совместного культивирования) в отношении фитопатогенов: 1 – *Fusarium tricinctum*; 2 – *Fusarium culmorum*; 3 – *Fusarium poae*

Figure 2. Antipathogenic activity of *Pantoea* strains (co-cultivation method): 1 – *Fusarium tricinctum*; 2 – *Fusarium culmorum*; and 3 – *Fusarium poae*



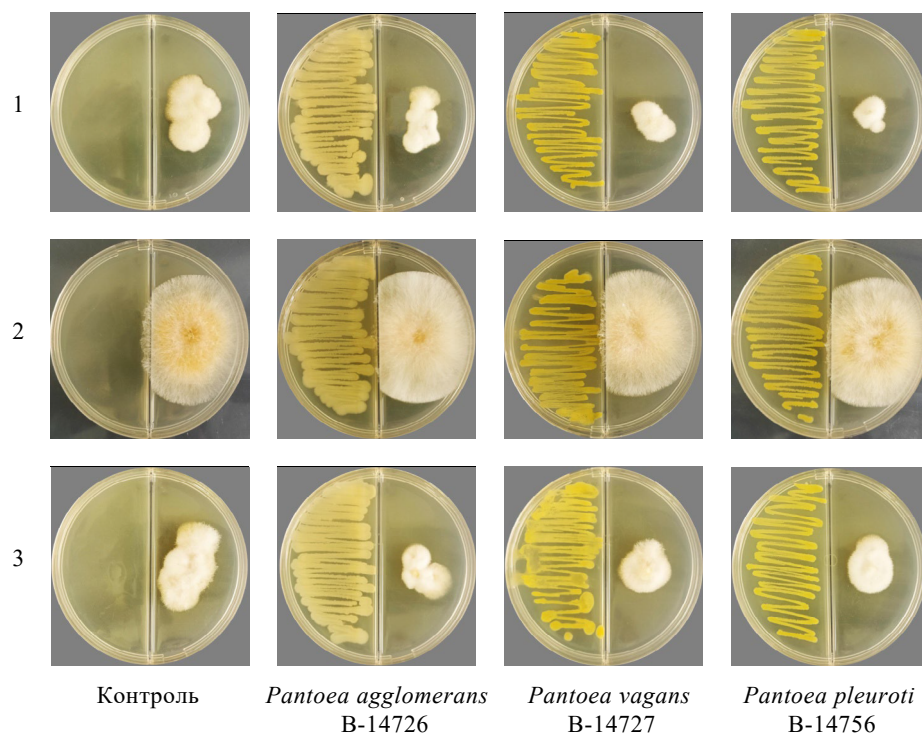


Рисунок 3. Антагонистическая активность штаммов *Pantoea* (методом ингибирования роста летучими органическими соединениями) в отношении фитопатогенов: 1 – *Fusarium tricinctum*; 2 – *Fusarium culmorum*; 3 – *Fusarium poae*

Figure 3. Antipathogenic activity of *Pantoea* strains (growth inhibition by volatile organic compounds): 1 – *Fusarium tricinctum*; 2 – *Fusarium culmorum*; and 3 – *Fusarium poae*

Таблица 1. Результаты определения антагонистической активности *Pantoea* в отношении фитопатогенов

Table 1. Antagonistic activity of *Pantoea* against phytopathogens

| Фитопатоген                                                      | Штамм                              |                               |                                 |
|------------------------------------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|
|                                                                  | <i>Pantoea agglomerans</i> B-14726 | <i>Pantoea vagans</i> B-14727 | <i>Pantoea pleuroti</i> B-14756 |
| Метод лунок, см                                                  |                                    |                               |                                 |
| <i>Fusarium tricinctum</i>                                       | 0                                  | 6,0 ± 0,3                     | 0                               |
| <i>Fusarium culmorum</i>                                         | 2,4 ± 0,1                          | 3,5 ± 0,2                     | 0                               |
| <i>Fusarium poae</i>                                             | 2,5 ± 0,1                          | 4,8 ± 0,2                     | 0                               |
| Метод совместного культивирования, %                             |                                    |                               |                                 |
| <i>Fusarium tricinctum</i>                                       | 63,3 ± 3,1                         | 68,8 ± 3,4                    | 0                               |
| <i>Fusarium culmorum</i>                                         | 0                                  | 0                             | 0                               |
| <i>Fusarium poae</i>                                             | 0                                  | 42,2 ± 2,1                    | 42,2 ± 2,1                      |
| Метод ингибирования роста летучими органическими соединениями, % |                                    |                               |                                 |
| <i>Fusarium tricinctum</i>                                       | 54,6 ± 2,7                         | 46,5 ± 2,3                    | 53,4 ± 2,6                      |
| <i>Fusarium culmorum</i>                                         | 1,0 ± 0,1                          | 3,0 ± 0,1                     | 1,0 ± 0,1                       |
| <i>Fusarium poae</i>                                             | 38,7 ± 1,9                         | 30,6 ± 1,5                    | 30,6 ± 1,5                      |

до 27–35 см, что свидетельствует о выраженной антифунгальной активности штаммов *P. agglomerans* [51].

В работе М. Saadaoui et al. [52] эндофитные штаммы *P. agglomerans*, выделенные из корней пшеницы, эффективно подавляли рост *F. culmorum* при совместном культивировании. Авторы отмечают формирование выраженной зоны ингибирования между колониями микроорганизмов и связывают антифунгальный эффект с продукцией сидерофоров, гидролитических фер-

ментов и фитогормонов, участвующих в подавлении развития фитопатогена и повышении устойчивости растений к инфекции.

*P. agglomerans* продуцирует антибиотические соединения (гербиколины А, гербиколины В и андримин), обладающие выраженным фунгистатическим действием в отношении представителей рода *Fusarium* [53, 54]. В связи с этим можно предположить, что высокий антагонистический потенциал штамма *P. agglomerans*

В-14726, который выявлен в настоящей работе, обусловлен продуцированием аналогичных соединений. Тем не менее для понимания механизмов антагонистической активности требуется проведение дополнительных исследований.

Особый интерес представляет штамм *P. pleuroti* В-14756. При использовании метода лунок антагонистическая активность данного штамма не проявлялась ни в одном из исследованных вариантов. Однако в условиях совместного культивирования *P. pleuroti* В-14756 демонстрировал выраженное подавление роста фитопатогенов: в отношении *F. poae* уровень ингибирования составлял 42,2 %. Таким образом, активность *P. pleuroti* В-14756 сопоставима с эффективностью *P. agglomerans* В-14726 и лишь незначительно уступает *P. vagans* В-14727. Отсутствие зон ингибирования методом лунок при высокой активности в условиях совместного культивирования указывает на то, что антагонистический эффект данного штамма связан преимущественно с продуцированием летучих органических соединений или контактными механизмами взаимодействия. Аналогичные особенности описаны для растительно-ассоциированных представителей рода *Pantoea*, проявляющих выраженную биоконтрольную активность в отношении *Fusarium* spp. [55–57].

Максимальная антифунгальная активность среди всех исследованных вариантов зафиксирована у *P. vagans* В-14727 в отношении *F. tricinctum* (комплекс видов) при совместном культивировании – 68,8 %. Данный показатель превышал эффективность *P. agglomerans* В-14726 против *F. poae*, определенную методом лунок (2,5 см) более чем в 27 раз при сравнении относительных величин ингибирования.

Наибольшим антифунгальным потенциалом обладал штамм *P. vagans* В-14727, продемонстрировавший максимальный ингибирующий эффект по всем используемым методам (до 6,0 см методом лунок и до 68,8 % при сокультивировании). *P. agglomerans* В-14726 характеризуется умеренной, но стабильной активностью, особенно выраженной в условиях совместного роста (до 63,3 %). Эффективность *P. pleuroti* В-14756 носит избирательный характер и проявляется преимущественно при непосредственном контакте с патогеном, обеспечивая подавление роста на уровне 46,6 %. Полученные данные подтверждают перспективность использования изученных штаммов рода *Pantoea* в качестве агентов биологического контроля фитопатогенных грибов рода *Fusarium*.

Пик степени ингибирования роста фитопатогенов летучими органическими соединениями выявлен в отношении *F. tricinctum*. Для *P. agglomerans* В-14726 подавление роста составило 54,65 %; для *P. vagans* В-14727 – 46,5 %; для *P. pleuroti* В-14756 – 53,4 %, что свидетельствует о высокой чувствительности данного патогена к летучим метаболитам исследуемых бактерий.

В отношении *F. poae* также наблюдалось выраженное ингибирующее действие: степень подавления роста

составила 38,7 % для *P. agglomerans* В-14726 и 30,6 % для *P. vagans* В-14727 и *P. pleuroti* В-14756.

Наименьшая чувствительность к летучим органическим соединениям бактерий отмечена у *F. culmorum*. Подавление роста данного фитопатогена не превышало 3,0 %, что указывает на практически полное отсутствие ингибирующего эффекта исследуемых штаммов.

Результаты анализа способности бактерий рода *Pantoea* снижать токсическое воздействие фитопатогенов на пшеницу (*Triticum aestivum* L.) представлены в таблице 2.

Анализ показал наличие выраженных ростостимулирующей и антагонистической активностей бактерий рода *Pantoea* в условиях заражения семян фитопатогенными грибами *Fusarium*. Исследуемые штаммы в различной степени способствовали повышению всхожести семян, стимуляции роста проростков и развитию корней по сравнению с инфицированным контролем.

Максимальный положительный эффект выявлен при заражении *F. culmorum*. В инфицированном контроле прорастание семян отсутствовало. Обработка штаммом *P. pleuroti* В-14756 обеспечивала прорастание в среднем 53,3 % семян, формирование ростков длиной 1,7 см и корней длиной 4,5 см. При обработке штаммом *P. vagans* В-14727 прорастало в среднем 30,0 % семян, а длина ростка и корня составляла 1,2 и 2,5 см соответственно. Штамм *P. agglomerans* В-14726 проявлял менее выраженное защитное действие: количество проросших семян достигало 13,3 %, длина ростка – 0,6 см, длина корня – 1,0 см. При этом доля зараженных семян во всех вариантах оставалась высокой (90,0–96,7 %).

При заражении *F. tricinctum* положительного влияния бактериальных штаммов на количество проросших семян не выявлено. В инфицированном контроле прорастало в среднем 36,7 % семян, тогда как после обработки *P. agglomerans* В-14726, *P. vagans* В-14727 и *P. pleuroti* В-14756 данный показатель был равен 33,3; 26,7 и 23,3 % соответственно. Длина ростков также была ниже контрольного значения. Вместе с тем *P. vagans* В-14727 и *P. pleuroti* В-14756 способствовали увеличению средней длины корней до 5,3 и 5,9 см соответственно по сравнению с 4,8 см в инфицированном контроле. Обработка штаммом *P. pleuroti* В-14756 также сопровождалась снижением доли зараженных семян с 96,7 до 80,0 %.

В условиях заражения *F. poae* штаммы *P. agglomerans* В-14726 и *P. vagans* В-14727 повышали количество проросших семян с 33,3 % в контроле до 46,7 и 56,7 % соответственно. Штамм *P. pleuroti* В-14756 не изменял количество проросших семян, но обеспечивал увеличение средней длины корня до 7,1 см по сравнению с 6,3 см в инфицированном контроле. Более значительное снижение доли зараженных семян в опыте с *F. poae* зафиксировано при использовании *P. agglomerans* В-14726 – с 96,7 до 80,0 % по сравнению с другими вариантами.

Таблица 2. Способность бактерий рода *Pantoea* снижать токсическое воздействие фитопатогенов на пшеницу (*Triticum aestivum* L.)Table 2. The ability of bacteria of the genus *Pantoea* to reduce the toxic effects of phytopathogens on wheat (*Triticum aestivum* L.)

| Показатель                     | Контроль   | <i>Pantoea agglomerans</i><br>B-14726 | <i>Pantoea vagans</i><br>B-14727 | <i>Pantoea pleuroti</i><br>B-14756 |
|--------------------------------|------------|---------------------------------------|----------------------------------|------------------------------------|
| <i>Fusarium tricinctum</i>     |            |                                       |                                  |                                    |
| Количество проросших семян, %  | 36,7 ± 1,2 | 33,3 ± 0,7                            | 26,7 ± 1,0                       | 23,3 ± 1,1                         |
| Количество зараженных семян, % | 96,7 ± 3,3 | 95,0 ± 2,5                            | 96,7 ± 3,3                       | 80,0 ± 2,3                         |
| Длина ростка, см               | 3,9 ± 0,1  | 1,8 ± 0,1                             | 2,4 ± 0,1                        | 2,5 ± 0,1                          |
| Длина корня, см                | 4,8 ± 0,1  | 4,7 ± 0,2                             | 5,3 ± 0,2                        | 5,9 ± 0,1                          |
| <i>Fusarium culmorum</i>       |            |                                       |                                  |                                    |
| Количество проросших семян, %  | 0          | 13,3 ± 0,4                            | 30,0 ± 1,1                       | 53,3 ± 1,7                         |
| Количество зараженных семян, % | 96,7 ± 3,3 | 93,3 ± 2,4                            | 96,7 ± 3,3                       | 90,0 ± 1,9                         |
| Длина ростка, см               | 0          | 0,6 ± 0,1                             | 1,2 ± 0,1                        | 1,7 ± 0,1                          |
| Длина корня, см                | 0          | 1,0 ± 0,1                             | 2,5 ± 0,1                        | 4,5 ± 0,2                          |
| <i>Fusarium poae</i>           |            |                                       |                                  |                                    |
| Количество проросших семян, %  | 33,3 ± 1,4 | 46,7 ± 1,6                            | 56,7 ± 2,3                       | 33,3 ± 0,8                         |
| Количество зараженных семян, % | 96,7 ± 3,3 | 80,0 ± 2,5                            | 95,0 ± 2,0                       | 90,0 ± 2,5                         |
| Длина ростка, см               | 5,9 ± 0,3  | 2,9 ± 0,1                             | 2,2 ± 0,1                        | 3,6 ± 0,1                          |
| Длина корня, см                | 6,3 ± 0,2  | 5,9 ± 0,2                             | 3,2 ± 0,1                        | 7,1 ± 0,3                          |
| Контроль без заражения         |            |                                       |                                  |                                    |
| Количество проросших семян, %  | 56,7 ± 1,7 | 23,3 ± 0,5                            | 63,3 ± 2,0                       | 76,7 ± 2,2                         |
| Количество зараженных семян, % | 0          | 0                                     | 0                                | 0                                  |
| Длина ростка, см               | 7,1 ± 0,1  | 3,0 ± 0,1                             | 6,4 ± 0,1                        | 6,2 ± 0,1                          |
| Длина корня, см                | 6,0 ± 0,2  | 3,9 ± 0,2                             | 5,9 ± 0,1                        | 6,8 ± 0,2                          |

Полученные результаты исследования свидетельствуют о том, что штаммы *P. agglomerans* B-14726 и *P. vagans* B-14727 преимущественно проявляли ростостимулирующее действие, способствуя увеличению длины ростков и корней, тогда как *P. pleuroti* B-14756 отличался наиболее выраженными антагонистическими свойствами и обеспечивал повышение всхожести семян в условиях сильного фитопатогенного воздействия. Данные подтверждают перспективность использования исследуемых штаммов рода *Pantoea* в качестве агентов биоконтроля фитопатогенов злаковых культур.

### Выводы

Установлено, что изученные штаммы *Pantoea agglomerans* B-14726, *P. vagans* B-14727 и *P. pleuroti* B-14756 обладают антагонистической активностью в отношении фитопатогенных грибов рода *Fusarium*. Выраженность и характер наблюдаемого эффекта определялись видом фитопатогена, а также преобладающими механизмами бактериального антагонизма, которые по-разному проявлялись в различных экспериментальных моделях. Штамм *P. vagans* B-14727 превосходил другие штаммы по антифунгальной активности: максимальные показатели ингибирования получены в отношении *Fusarium tricinctum* методом лунок (6,0 см) и при совместном культивировании (68,8 %). Штамм *P. agglomerans* B-14726 обладал стабильной антагонистической активностью и обеспечивал высокий уровень подавления роста фитопатогенов как при совместном

культивировании (до 63,3 %), так и под действием летучих органических соединений (до 54,6 %). *P. pleuroti* B-14756 был лишен антагонистической активности при исследовании методом лунок, однако эффективно ингибировал рост фитопатогенов при совместном культивировании и воздействии летучих органических соединений, что свидетельствует о важной роли контактных взаимодействий и летучих метаболитов в механизме его антагонизма. Чувствительным к действию исследуемых штаммов оказался *F. tricinctum*, в то время как *F. culmorum* обладал наименьшей чувствительностью к летучим органическим соединениям бактерий. Максимальные защитные свойства зафиксированы у штамма *P. pleuroti* B-14756, в то время как у *P. agglomerans* B-14726 и *P. vagans* B-14727 обнаруживали преимущественно ростостимулирующее действие. Полученные результаты подтверждают перспективность использования изученных штаммов рода *Pantoea* в качестве основы биологического препарата для защиты злаковых культур от фузариозной инфекции и повышения устойчивости растений к фитопатогенам.

### 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 potential conflict of interest regarding the research, authorship, and/or publication of this article.

### Список литературы / References

1. Schmidt R, Jager V, Dickschat JS, Garbeva P, *et al.* Deciphering the genome and secondary metabolome of the plant pathogen *Fusarium culmorum*. FEMS Microbiology Ecology. 2018;94(6):fiy078. <https://doi.org/10.1093/femsec/fiy078>
2. Ступко В. Ю., Луговцова С. Ю., Нешумаева Н. А. Влияние фильтрата культуральной жидкости *Fusarium sporotrichioides* на каллусную культуру пшеницы. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2025. Т. 26. № 1. С. 129–140. [Stupko VYu, Lugovtsova SYu, Neshumaeva NA. Effect of culture filtrates of *Fusarium sporotrichioides* on wheat callus culture. Agricultural Science Euro-North-East. 2025;26(1):129–140. (In Russ.)] <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2025.26.1.129-140>
3. Birr T, Hasler M, Verreet JA, Klink H. Composition and predominance of *Fusarium* species causing *Fusarium* head blight in winter wheat grain depending on cultivar susceptibility and meteorological factors. Microorganisms. 2020;8(4):617. <https://doi.org/10.3390/microorganisms8040617>
4. Somma S, Logrieco AF, Moretti A, Scarpino V, Reyneri A, *et al.* Impact of fungicide application to control T-2 and HT-2 toxin contamination and related *Fusarium sporotrichioides* and *F. langsethiae* producing species in durum wheat. Crop Protection. 2022;159:106020. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2022.106020>
5. Góral T, Grelewska-Nowotko K, Ochodzki P, Wiewióra B. DNA-based quantification of *Fusarium* species in winter wheat grain in Poland from 2014 to 2017 and 2019. Agronomy. 2025;15(10):2430. <https://doi.org/10.3390/agronomy15102430>
6. Mesterhazy A. What is *Fusarium* head blight (FHB) resistance and what are its food safety risks in wheat? Problems and solutions – a review. Toxins. 2024;16(1):31. <https://doi.org/10.3390/toxins16010031>
7. Nielsen LK, Cook DJ, Edwards SG, Ray RV. The prevalence and impact of *Fusarium* head blight pathogens and mycotoxins on malting barley quality in the UK. International Journal of Food Microbiology. 2014;179:38–49. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2014.03.023>
8. Qu Z, Ren X, Du Z, Hou J, Li Y, *et al.* *Fusarium* mycotoxins: The major food contaminants. mLife. 2024;3(2):176–206. <https://doi.org/10.1002/mlf2.12112>
9. Torres AM, Palacios SA, Yerkovich N, Palazzini JM, Battilani P, *et al.* *Fusarium* head blight and mycotoxins in wheat: Prevention and control strategies across the food chain. World Mycotoxin Journal. 2019;12(4):333–355. <https://doi.org/10.3920/WMJ2019.2438>
10. Spanic V, Maricevic M, Ikic I, Sulyok M, Sarcevic H. Three-year survey of *Fusarium* multi-metabolites/mycotoxins contamination in wheat samples in potentially epidemic FHB conditions. Agronomy. 2023;13(3):805. <https://doi.org/10.3390/agronomy13030805>
11. Pierzgalski A, Bryła M, Kanabus J, Modrzejewska M, Podolska G. Updated review of the toxicity of selected *Fusarium* toxins and their modified forms. Toxins. 2021;13(11):768. <https://doi.org/10.3390/toxins13110768>
12. Rachitha P, Krupashree K, Jayashree GV, Gopalan N, Khanum F. Growth inhibition and morphological alteration of *Fusarium sporotrichioides* by *Mentha piperita* essential oil. Pharmacognosy Research. 2017;9(1):74–79. <https://doi.org/10.4103/0974-8490.199771>
13. Morcia C, Tumino G, Ghizzoni R, Badeck FW, Lattanzio VMT, *et al.* Occurrence of *Fusarium langsethiae* and T-2 and HT-2 toxins in Italian malting barley. Toxins. 2016;8(8):247. <https://doi.org/10.3390/toxins8080247>
14. Nossol C, Landgraf P, Barta-Böszörmenyi A, Kahlert S, Kluess J, *et al.* Deoxynivalenol affects cell metabolism *in vivo* and inhibits protein synthesis in IPEC-1 cells. Mycotoxin Research. 2023;39(3):219–231. <https://doi.org/10.1007/s12550-023-00489-z>
15. Li J, Wang Y, Deng Y, Wang X, Wu W, *et al.* Toxic mechanisms of the trichothecenes T-2 toxin and deoxynivalenol on protein synthesis. Food and Chemical Toxicology. 2022;164:113044. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2022.113044>
16. Gil-Serna J, Patiño B, Verheeeke-Vaessen C, Vázquez C, Medina Á. Searching for the *Fusarium* spp. which are responsible for trichothecene contamination in oats. Using metataxonomy to compare the distribution of toxigenic species in fields from Spain and the UK. Toxins. 2022;14(9):592. <https://doi.org/10.3390/toxins14090592>
17. Chastukhina IB, Ryazanov EA, Ponomarev SN, Ivanova IO, Pavlova SY, *et al.* *Fusarium* species associated with spikes and grains of cereal crops in the Volga region: Virulence and toxin-producing potential. Journal of Fungi. 2025;11(12):841. <https://doi.org/10.3390/jof11120841>
18. Johns LE, Bebbler DP, Gurr SJ, Brown NA. Emerging health threat and cost of *Fusarium* mycotoxins in European wheat. Nature Food. 2022;3(12):1014–1019. <https://doi.org/10.1038/s43016-022-00655-z>
19. Motallebi P, Tonti S, Niknam V, Ebrahimzadeh H, Pisi A, *et al.* Induction of basal resistance by methyl jasmonate against *Fusarium culmorum* in bread wheat. Cereal Research Communications. 2017;45(2):248–259. <https://doi.org/10.1556/0806.45.2017.008>



20. Piasecka A, Sawikowska A, Witaszak N, Waśkiewicz A, Kańczurzeńska M, et al. Metabolomic aspects of conservative and resistance-related elements of response to *Fusarium culmorum* in the grass family. *Cells*. 2022;11(20):3213. <https://doi.org/10.3390/cells11203213>
21. Miedaner T, Vasquez A, Castiblanco V, Castillo HE, Foroung N, et al. Genome-wide association study for deoxynivalenol production and aggressiveness in wheat and rye head blight by resequencing 92 isolates of *Fusarium culmorum*. *BMC Genomics*. 2021;22:630. <https://doi.org/10.1186/s12864-021-07931-5>
22. Shi W, Tan Y, Wang S, Gardiner DM, De Saeger S, et al. Mycotoxigenic potentials of *Fusarium* species in various culture matrices revealed by mycotoxin profiling. *Toxins*. 2017;9(1):6. <https://doi.org/10.3390/toxins9010006>
23. Yan H, Nelson B. Effect of temperature on *Fusarium solani* and *F. tricinctum* growth and disease development in soybean. *Canadian Journal of Plant Pathology*. 2020;42(4):527–537. <https://doi.org/10.1080/07060661.2020.1745893>
24. Hellin P, Dedeurwaerder G, Duvivier M, Scauflaire J, Huybrechts B, et al. Relationship between *Fusarium* spp. diversity and mycotoxin contents of mature grains in southern Belgium. *Food Additives & Contaminants: Part A*. 2016;33(7):1228–1240. <https://doi.org/10.1080/19440049.2016.1185900>
25. Wang Y, Wang R, Sha Y. Distribution, pathogenicity and disease control of *Fusarium tricinctum*. *Frontiers in Microbiology*. 2022;13:939927. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.939927>
26. Karlsson I, Persson P, Friberg H. *Fusarium* head blight from a microbiome perspective. *Frontiers in Microbiology*. 2021;12:628373. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.628373>
27. Fotina NV, Serazetdinova YR, 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.bcab.2024.103294>
28. Shi C, Yan P, Li J, Wu H, Li Q, et al. Biocontrol of *Fusarium graminearum* growth and deoxynivalenol production in wheat kernels with bacterial antagonists. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2014;11(1):1094–1105. <https://doi.org/10.3390/ijerph110101094>
29. Awal MA, Abdullah NS, Prismantoro D, Dwisandi RF, Safitri R, et al. Mechanisms of action and biocontrol potential of *Trichoderma* against *Fusarium* in horticultural crops. *Cogent Food & Agriculture*. 2024;10(1):2394685. <https://doi.org/10.1080/23311932.2024.2394685>
30. Villavicencio-Vásquez M, Espinoza-Lozano F, Espinoza-Lozano L, Coronel-León J. Biological control agents: Mechanisms of action, selection, formulation and challenges in agriculture. *Frontiers in Agronomy*. 2025;7:1578915. <https://doi.org/10.3389/fagro.2025.1578915>
31. Lorenzi AS, Bonatelli ML, Chia MA, Peressim L, Quecine MC. Opposite sides of *Pantoea agglomerans* and its associated commercial outlook. *Microorganisms*. 2022;10(10):2072. <https://doi.org/10.3390/microorganisms10102072>
32. 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>
33. Kamber T, Lansdell TA, Stockwell VO, Ishimaru CA, Smits THM, et al. Characterization of the biosynthetic operon for the antibacterial peptide herbicolin in *Pantoea vagans* biocontrol strain C9-1 and incidence in *Pantoea* species. *Applied and Environmental Microbiology*. 2012;78(12):4412–4419. <https://doi.org/10.1128/AEM.07351-11>
34. Quecine MC, Araújo WL, Rossetto PB, Ferreira A, Tsui S, et al. Sugarcane growth promotion by the endophytic bacterium *Pantoea agglomerans* 33.1. *Applied and Environmental Microbiology*. 2012;78(21):7511–7518. <https://doi.org/10.1128/AEM.00836-12>
35. Kumar P, Rani S, Dahiya P, Kumar A, Dang AS, et al. Whole genome analysis for plant growth promotion profiling of *Pantoea agglomerans* CPHN2, a non-rhizobial nodule endophyte. *Frontiers in Microbiology*. 2022;13:998821. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.998821>
36. Luziatelli F, Ficca AG, Cardarelli M, Melini F, Cavalieri A, et al. Genome sequencing of *Pantoea agglomerans* C1 provides insights into molecular and genetic mechanisms of plant growth-promotion and tolerance to heavy metals. *Microorganisms*. 2020;8(2):153. <https://doi.org/10.3390/microorganisms8020153>
37. Timofeeva AM, Galyamova MR, Sedykh SE. How do plant growth-promoting bacteria use plant hormones to regulate stress reactions? *Plants*. 2024;13(17):2371. <https://doi.org/10.3390/plants13172371>
38. Li L, Huang T, Liu H, Zang J, Wang P, et al. Purification, structural characterization and anti-UVB irradiation activity of an extracellular polysaccharide from *Pantoea agglomerans*. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2019;137:1002–1012. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.06.191>
39. Ansari FA, Ahmad I, Pichtel J, Husain FM. *Pantoea agglomerans* FAP10: A novel biofilm-producing PGPR strain improves wheat growth and soil resilience under salinity stress. *Environmental and Experimental Botany*. 2024;222:105759. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2024.105759>
40. Soltani H, Hassani A, Sari MBA, Hanifei M. The phosphate solubilizing and N fixing *Pantoea agglomerans* bacteria affecting yield and biochemical properties including nutrient uptake of different tomato genotypes. *Journal of Trace Elements and Minerals*. 2025;12:100225. <https://doi.org/10.1016/j.jtemin.2025.100225>

41. Бородин 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>
42. 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. [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>
43. Asyakina LK, Serazetdinova YuR, Frolova AS, Fotina NV, Neverova OA, et al. Antagonistic activity of extremophilic bacteria against phytopathogens in agricultural crops. Food Processing: Techniques and Technology. 2023;53(3):565–575. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2023-3-2457>
44. Gerlach W, Nirenberg H. The genus *Fusarium*: A pictorial atlas. Hamburg: Paul Parey; 1982. 406 p.
45. Nysanth NS, Sivapriya SL, Natarajan C, Anith KN. Novel *in vitro* methods for simultaneous screening of two antagonistic bacteria against multiple fungal phytopathogens in a single agar plate. 3 Biotech. 2022;12(6):140. <https://doi.org/10.1007/s13205-022-03205-3>
46. Li W, Wang X, Jiang Y, Cui S, Hu J, et al. Volatile organic compounds produced by co-culture of *Burkholderia vietnamiensis* B418 with *Trichoderma harzianum* T11-W exhibits improved antagonistic activities against fungal phytopathogens. International Journal of Molecular Sciences. 2024;25(20):11097. <https://doi.org/10.3390/ijms252011097>
47. Goswami M, Deka S. Isolation of a novel rhizobacteria having multiple plant growth promoting traits and antifungal activity against certain phytopathogens. Microbiological Research. 2020;240. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2020.126516>
48. 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>
49. 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>
50. Bi W, Wang R, Yang Y, Wang Y, Ma Z, et al. *Pantoea vagans* strain BWL1 controls blue mold in mandarin fruit by inhibiting ergosterol biosynthesis in *Penicillium expansum*. Biological Control. 2021;163:104745. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2021.104745>
51. Turaeva B, Zukhritdinova N, Kutlieva G, Makhkamov A, Keldiyorov X. Microflora and plant pathogenic fungi affecting bacteria in grape plantations in Uzbekistan. SABRAO Journal of Breeding and Genetics. 2023;55(6):2037–2051. <http://doi.org/10.54910/sabao2023.55.6.17>
52. Saadaoui M, Faize M, Rifai A, Tayeb K, Omri Ben Youssef N, et al. Evaluation of Tunisian wheat endophytes as plant growth promoting bacteria and biological control agents against *Fusarium culmorum*. PLOS One. 2024;19(5):e0300791. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0300791>
53. Xu S, Liu YX, Cernava T, Wang H, et al. *Fusarium* fruiting body microbiome member *Pantoea agglomerans* inhibits fungal pathogenesis by targeting lipid rafts. Nature Microbiology. 2022;7:831–843. <https://doi.org/10.1038/s41564-022-01131-x>
54. Ma Y, Yin Y, Rong C, Chen S, Liu Y, et al. *Pantoea pleuroti* sp. nov., isolated from the fruiting bodies of *Pleurotus eryngii*. Current Microbiology. 2016;72:207–212. <https://doi.org/10.1007/s00284-015-0940-5>
55. Crosby KC, Rojas M, Sharma P, Johnson MA, et al. Genomic delineation and description of species and within-species lineages in the genus *Pantoea*. Frontiers in Microbiology. 2023;14:1254999. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1254999>
56. 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>
57. Guardiola-Márquez CE, Santos-Ramírez MT, Figueroa-Montes ML, Valencia-de Los Cobos EO, et al. Identification and characterization of beneficial soil microbial strains for the formulation of biofertilizers based on native plant growth-promoting microorganisms isolated from Northern Mexico. Plants. 2023;12(18):3262. <https://doi.org/10.3390/plants12183262>

#### Дополнительная информация об авторах / Additional information about the authors

Фасхутдинова Елизавета Рафаиловна / Elizaveta R. Faskhutdinova ORCID 0000-0001-9711-2145; eLIBRARY SPIN 6173-3576  
Афони́на Ю́лия Евге́ньевна / Yulia E. Afonina ORCID 0009-0001-2669-7112; eLIBRARY SPIN 8622-1475  
Шевель Арина Андреевна / Arina A. Shevel ORCID 0009-0000-3630-2826; eLIBRARY SPIN 5159-2151  
Евдокимов Виталий Сергеевич / Vitaly S. Evdokimov  
Нешумаева Надежда Алексеевна / Nadezhda A. Neshumaeva ORCID 0000-0002-7314-9418; eLIBRARY SPIN 5625-3519  
Аксенова Лариса Михайловна / Larisa M. Aksenova ORCID 0009-0009-9927-3642; eLIBRARY SPIN 6604-7452  
Федорова Анастасия Михайловна / Anastasiya M. Fedorova ORCID 0000-0002-8071-4411; eLIBRARY SPIN 4142-7468

<https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-3-2657>  
<https://elibrary.ru/ALMTCW>

Оригинальная статья  
<https://fptt.ru>

## Определение товарного сорта ягод вишни с использованием сверточных нейронных сетей



А. М. Попов<sup>ORCID</sup>, А. В. Шафрай\*<sup>ORCID</sup>, В. С. Косинов<sup>ORCID</sup>,  
Г. И. Подберезен<sup>ORCID</sup>, Д. В. Сухоруков<sup>ORCID</sup>, С. С. Комаров<sup>ORCID</sup>

Кемеровский государственный университет<sup>ORCID</sup>, Кемерово, Россия

Поступила в редакцию: 15.06.2026

Принята после рецензирования: 24.08.2026

Принята к публикации: 01.09.2026

©

А. М. Попов, А. В. Шафрай, В. С. Косинов, Г. И. Подберезен,  
Д. В. Сухоруков, С. С. Комаров, 2026

\*e-mail: [shafraia@mail.ru](mailto:shafraia@mail.ru)



### Аннотация.

Ручной контроль качества плодово-ягодного сырья на этапе приемки остается одной из ключевых задач пищевой промышленности. Существующие методы визуальной оценки субъективны, трудоемки и зависят от квалификации оператора, что ограничивает их эффективность в условиях современного производства. Цель исследования – применить модели сверточных нейронных сетей семейства YOLO для классификации ягод вишни по товарным сортам на этапе приемки сырья.

Объект исследования – ягоды вишни культурных сортов (*Prunus subg. Cerasus*), собранные в Кемеровской области в 2024 г. (Россия). Исследование выполнено на базе ООО «НПО Здоровое питание» (Кемерово, Россия). Собраны и размечены изображения четырех категорий качества. Проведено сравнение пяти моделей YOLO (YOLOv8m, YOLOv9m, YOLO11m, YOLO12m, YOLO26m) и трех вариантов архитектуры YOLO12 по размеру. Для выбранной модели YOLO12m оптимизированы гиперпараметры: сравнивались восемь оптимизаторов, четыре значения размера батча и пять значений коэффициента регуляризации Dropout.

Установлено, что наилучшую точность показала модель среднего размера YOLO12. Среди оптимизаторов наивысшие метрики зафиксированы для SGD. Определен оптимальный размер обучающего пакета; изменение параметра Dropout не оказало заметного влияния на результаты. Увеличение числа эпох финального обучения повысило качество распознавания по всем четырем категориям. Работоспособность модели подтверждена на производственной выборке. На основе модели разработан прототип программы с графическим интерфейсом для загрузки изображений, визуализации детекции и формирования отчета. Результаты подтверждают пригодность моделей YOLO для автоматизации входного контроля качества ягод вишни, обеспечивая объективный и воспроизводимый анализ взамен субъективной ручной оценки, и создают основу для внедрения промышленных систем контроля качества.

**Ключевые слова.** Искусственный интеллект, нейронные сети, YOLO, пищевая промышленность, переработка сырья, ягоды вишни

**Финансирование.** Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-26-00136, <https://rscf.ru/project/25-26-00136/>

**Для цитирования:** Попов А. М., Шафрай А. В., Косинов В. С., Подберезен Г. И., Сухоруков Д. В. и др. Определение товарного сорта ягод вишни с использованием сверточных нейронных сетей. Техника и технология пищевых производств. 2026. Т. 56. № 3. С. 516–525. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-3-2657>

## Convolutional Neural Networks in Commercial Grading of Cherry



Anatoly M. Popov<sup>ID</sup>, Anton V. Shafrai<sup>\*ID</sup>, Vitaly S. Kosinov<sup>ID</sup>,  
Grigory I. Podberezen<sup>ID</sup>, Dmitry V. Sukhorukov<sup>ID</sup>, Sergey S. Komarov<sup>ID</sup>

Kemerovo State University<sup>ROR</sup>, Kemerovo, Russia

Received: 15.06.2026  
Revised: 24.08.2026  
Accepted: 01.09.2026

\*e-mail: [shafraia@mail.ru](mailto:shafraia@mail.ru)

© A.M. Popov, A.V. Shafrai, V.S. Kosinov, G.I. Podberezen,  
D.V. Sukhorukov, S.S. Komarov, 2026



### Abstract.

Manual quality control of fruit and berries remains a major challenge in the food industry. Existing visual assessment methods are subjective, labor-intensive, and dependent on operator skills, which limits their effectiveness in modern production environments. However, convolutional neural network models of the YOLO type can be used to classify cherries by commercial grade at the raw material acceptance stage.

The study focused on cultivated cherries (*Prunus* subg. *Cerasus*) harvested in the Kemerovo Region (Russia) in 2024. The research was conducted at the Zdorovye Pitaniye Research and Production Association (Kemerovo, Russia). The comparative analysis evaluated images across four quality categories using five YOLO models (YOLOv8m, YOLOv9m, YOLO11m, YOLO12m, YOLO26m) and three YOLO12 architectural variants of different sizes. Hyperparameter optimization was performed for the selected YOLO12m model, assessing eight optimizers, four batch sizes, and five Dropout regularization coefficient values.

The medium-sized YOLO12 model demonstrated the highest accuracy. Among the optimizers, SGD yielded the best performance metrics. The optimal training batch size was determined, while adjusting the Dropout parameter had no significant effect on the results. Increasing the number of final training epochs improved recognition performance across all four categories. The model's performance was validated on an industrial sample. Based on this model, a prototype software application with a graphical user interface (GUI) was developed for image loading, detection visualization, and report generation.

The results confirm the suitability of YOLO models for automating incoming cherry quality control, providing objective and reproducible analysis instead of subjective manual assessment, thereby paving the way for advanced industrial quality control systems.

**Keywords.** Artificial intelligence, neural networks, YOLO, food industry, raw material processing, cherry

**Funding.** The study was supported by the Russian Science Foundation, Grant No. 25-26-00136, <https://rscf.ru/en/project/25-26-00136/>

**For citation:** Popov AM, Shafrai AV, Kosinov VS, Podberezen GI, Sukhorukov DV, *et al.* Convolutional Neural Networks in Commercial Grading of Cherry. Food Processing: Techniques and Technology. 2026;56(3):516–525. (In Russ.) <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-3-2657>

### Введение

Применение искусственного интеллекта в пищевой инженерии расширяется с каждым годом. Значительная часть исследований посвящена оценке безопасности, качества и срока годности пищевых продуктов с привлечением методов машинного обучения. Среди наиболее распространенных инструментов фигурируют классические алгоритмы машинного обучения и нейронные сети. Из нейросетевых архитектур наиболее востребованы полносвязные, рекуррентные и сверточные нейронные сети, в т. ч. в рамках глубокого обучения. Данные методы охватывают широкий круг задач: от прогнозирования технологических параметров до визуальной оценки продукции.

В пищевой промышленности и сельском хозяйстве прочно вошли в практику механизация и автоматизация

производственных операций. В последние десятилетия наблюдается устойчивый тренд к их роботизации и цифровизации. Даже операции, традиционно выполнявшиеся человеком (например органолептическая оценка сырья), все чаще уступают место цифровым методам с включением искусственного интеллекта. Для этой цели используются электронные носы, электронные языки и системы компьютерного зрения [1, 2].

Е. Yavuzer *et al.* [3] разработали метод определения свежести фаршированных мидий на основе электронного носа (платформа Arduino) в сочетании с нейросетями ResNet и GoogLeNet [3]. D. R. Wijaya *et al.* [4] оценили свежесть морепродуктов с помощью электронного носа и алгоритмов машинного обучения, достигнув точности, близкой к 100 %. I. Zlobin *et al.* [5] предложили одноразовые электронные языки на основе



металлоорганических каркасов для классификации сортов чая с применением нейронных сетей. В другом исследовании электронный нос выступал в качестве инструмента для мониторинга порчи мяса, рыбы и молока [6]. Также предложен метод оценки микробиологических показателей молока с помощью массива газовых сенсоров на основе пьезокварцевых микровесов [7]. Отдельное направление посвящено комбинированию электронного носа и компьютерного зрения для определения степени готовности жареной курицы [8].

Спектроскопические и мультиспектральные методы в сочетании с машинным обучением также заняли значимое место в пищевой промышленности. X. Wu *et al.* [9] осуществили спектроскопический анализ совместно со сверточными сетями для выявления фальсификации меда с точностью классификации более 97 %. M. G. Lanjewar *et al.* [10] задействовали методы спектроскопии для обнаружения примесей крахмала в куркуме, где алгоритм Random Forest достиг коэффициента детерминации, равного 0,999. Гиперспектральная визуализация в ближнем инфракрасном диапазоне применялась для количественного определения красителя метанилового желтого в муке из нута с включением сверточных нейронных сетей [11]. R. Belugina *et al.* [12] предложили метод оценки концентрации фосфолипидов в растительных маслах на основе потенциометрических мультисенсорных систем с помощью метода опорных векторов и наименьших квадратов.

Компьютерное зрение представляет собой эффективный инструмент визуальной оценки качества пищевого сырья, позволяющий объективно анализировать внешний вид продукта независимо от квалификации оператора. C. N. Sánchez *et al.* [13] провели многомерный анализ изменения цвета говядины с помощью системы компьютерного зрения и методов машинного обучения для определения свежести продукта. В исследовании [14] методы машинного обучения использованы для прогнозирования свежести черники в условиях холодильной цепи по параметрам газовой среды хранения с точностью до 94 %. В обзорных зарубежных публикациях подчеркивается, что сочетание электронных носов с алгоритмами машинного обучения представляет собой мощный неразрушающий инструмент оценки качества пищевых продуктов в таких категориях, как мясо, молочная продукция, рыба, чай и кофе [15].

Вишня – распространенное сырье для быстрорастворимых гранулированных продуктов: морсов, киселей, сухих завтраков. Ее ягоды богаты органическими кислотами, сахарами, антоцианами и витаминами, которые определяют вкусовые и питательные свойства готовой продукции. Качество последней напрямую зависит от кондиции исходного сырья: некондиционные ягоды, удвоенные плоды и экземпляры с отростками негативно влияют на переработку, нарушая гранулирование и снижая однородность продукта.

Традиционный ручной контроль на приемке трудоемок и субъективен. Применение сверточных нейронных сетей позволяет автоматизировать оценку: сети извлекают визуальные признаки из изображений и относят каждую ягоду к соответствующему классу качества. Такой подход обеспечивает объективность и воспроизводимость результата независимо от квалификации оператора. Цель исследования – применить модели сверточных нейронных сетей семейства YOLO для классификации ягод вишни по товарным сортам на этапе приемки сырья.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- подготовить набор данных, содержащий изображения ягод вишни;
- обучить модели семейства YOLO на сформированном наборе данных;
- сравнить различные архитектуры и гиперпараметры;
- разработать прототип программного продукта на основе наиболее точной модели.

Новизна работы заключается в использовании актуальных моделей семейства YOLO для классификации ягод вишни по четырем категориям качества на этапе приемки сырья. В научной литературе задача классификации ягод вишни по товарным сортам в условиях реального производства освещена фрагментарно. Полученные результаты могут служить основой для разработки промышленных систем автоматического контроля качества плодово-ягодного сырья.

## Объекты и методы исследования

Объект исследования – ягоды вишни культурных сортов (*Prunus subg. Cerasus*), собранные в Кемеровской области в 2024 г. (Россия). Работа выполнена на базе ООО «НПО Здоровое питание» (Кемерово, Россия). Предмет исследования – методы классификации ягод вишни по товарным сортам на этапе приемки сырья с применением сверточных нейронных сетей семейства YOLO. Алгоритм использования нейронных сетей включал следующие этапы (рис. 1) [1]:

1. Формирование и подготовка датасета. На этом этапе создается размеченный набор изображений, репрезентирующий все товарные сорта вишни и типичные дефекты сырья.

1.1. Сбор и предварительная обработка изображений. Исходные снимки получены с помощью камеры Nikon D5300 kit 18–140 mm (Япония) в варьируемых условиях освещения и при разных ракурсах – для обеспечения инвариантности модели к внешним факторам. Поскольку сверточные архитектуры требуют фиксированного входного размера, все кадры приводятся к единому разрешению, диктуемому выбранной сетью.

1.2. Аннотирование. Каждому изображению присваивается метка класса (сорт или категория качества), которая служит целевой переменной в задаче классификации. Разметка выполнена в открытом инструменте Computer Vision Annotation Tool.

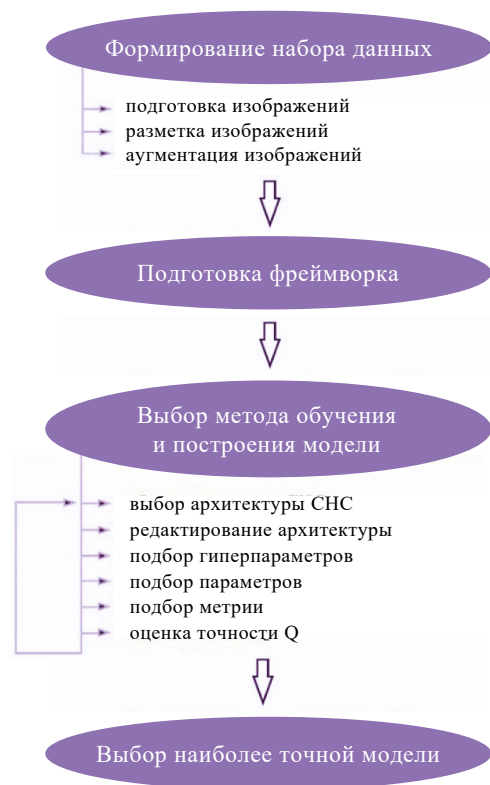


Рисунок 1. Принципиальная схема применения нейронных сетей

Figure 1. Neural network application diagram

1.3. Аугментация. При дефиците данных применяется их искусственное расширение за счет геометрических (повороты, отражения) и фотометрических (изменение яркости, контраста, добавление шума) преобразований. Это повышает разнообразие обучающей выборки и устойчивость сети к вариативности внешнего вида объектов, что в итоге улучшает обобщение.

2. Подключение библиотек. Загружаются программные пакеты для обработки изображений, управления данными и построения нейросетевых моделей.

3. Проектирование и обучение модели. Этап включает итерационный подбор архитектуры, гиперпараметров и стратегии обучения для достижения максимума целевой метрики.

3.1. Выбор базовой архитектуры. Используется подход переноса обучения (transfer learning) [14]: за основу берется сверточная сеть, предобученная на крупном наборе данных (например ImageNet), из семейств ResNet, EfficientNet, MobileNet и др. Внутри одного семейства перебираются варианты разной глубины (ResNet18, ResNet50 и т. п.) с учетом компромисса «точность – вычислительные затраты», критичного при потенциальном внедрении в производственные условия с ограниченными ресурсами.

3.2. Адаптация под задачу. Выходной слой предобученной сети (рассчитанный на 1000 классов ImageNet)

заменяется на полносвязный слой с числом нейронов, равным количеству классифицируемых категорий.

3.3. Настройка гиперпараметров. Определяются ключевые гиперпараметры: функция потерь, оптимизатор (Adam, SGD и др.), методы регуляризации (дропаут, L2-регуляризация), а также вспомогательные техники, такие как batch normalization, способствующие стабильности и скорости обучения [15]. Следует отметить, что эффекты отдельных параметров регуляризации могут различаться в зависимости от решаемой задачи и особенностей реализации в используемых фреймворках.

3.4. Параметры обучения. Фиксируются размер батча, число эпох, пропорция разбиения выборки (обучение/валидация/тест – например 80/10/10), а также возможность применения ранней остановки (early stopping) или динамического изменения скорости обучения (learning rate scheduling).

3.5. Оценка и выбор наилучшей модели. Качество классификации оценивается по метрикам: точность (precision), полнота (recall), F1-мера, матрица ошибок [16]. Поиск оптимальной конфигурации (архитектура + гиперпараметры) выполняется итеративно, в т. ч. с привлечением автоматизированных средств, и завершается при достижении требуемой точности и обобщающей способности.

Качество сырья, поступающего на переработку, регламентируется техническими условиями и государственными стандартами. Для гранулированных продуктов, в состав которых входит вишня (кисели, сухие напитки, морсы, сухие завтраки и др.), действует ГОСТ 33801-2016 «Вишня и черешня свежие. Технические условия». Стандарт устанавливает три товарных сорта: высший, первый и второй. Критерии сортового деления – доля здоровых, свежих ягод с однородной окраской, отсутствие дефектов формы и окраски, повреждений насекомыми-вредителями, а также избыточной внешней влажности.

Сорт партии сырья определяют по соотношению кондиционных (соответствующих требованиям сорта) и некондиционных ягод. На практике такую оценку проводят визуально по малой выборке, что делает процесс субъективным и трудоемким. При этом задача хорошо ложится на методы компьютерного зрения, в первую очередь на сверточные нейронные сети.

Съемка проведена на производственной площадке ООО «НПО Здоровое Питание» (Кемерово, Россия) камерой, установленной на этапе приемки сырья. Изображения получены при варьируемых освещении и ракурсах – для обеспечения инвариантности модели к внешним условиям. Кадры фиксируют как одиночные, так и групповые размещения ягод, отличающихся по размеру, форме и кондиции, что повышает устойчивость сети к вариативности объекта и сложным случаям распознавания. Собранные снимки сформировали структурированный датасет для последующей разметки и обучения модели.

Для получения целевых значений, требуемых для обучения нейронных сетей детектированию ягод, полученные снимки размечали: каждой ягоде на изображении присваивали метку. Разметка выполнена в программе для аннотирования изображений и видео Computer Vision Annotation Tool. В соответствии с технологической пригодностью сформировано четыре класса (рис. 2): класс 0 – кондиционная ягода; класс 1 – удвоенная ягода; класс 2 – ягода с отростком; класс 3 – некондиционная ягода. Разметка сохранена в формате YOLO, поддерживающем большинство нейросетевых фреймворков.

Нейронные сети – это вычислительные модели, состоящие из взаимосвязанных узлов (нейронов) [16], обучающиеся на данных: в процессе обучения веса связей корректируются так, чтобы минимизировать ошибку предсказания, за счет чего сеть последовательно повышает точность решений. Для обработки изображений применяются сверточные нейронные сети (СНС), учитывающие не только значения пикселей, но и их пространственное расположение – именно оно несет смысл визуальной информации. Существует множество архитектур, каждая из которых ориентирована на свой класс задач.

В рамках исследования необходимо обнаружить ягоду вишни на изображении, локализовать ее и классифицировать по категории качества. Это задача детекции объектов, которая требует одновременного прогнозирования координат ограничивающей рамки и принадлежности объекта к классу. Для ее решения чаще всего применяют предобученные СНС, среди которых выделяют семейства ResNet, EfficientNet, MobileNet и др. В настоящей работе выбран подход на основе архитектуры YOLO [17] – одного из наиболее распространенных решений для детекции изображений.

Ключевое отличие YOLO от других детекторов – изображение проходит через нейронную сеть ровно один раз. Принцип работы: изображение разбивается на сетку ячеек, каждая из которых самостоятельно предсказывает ограничивающие рамки, оценки уверенности и вероятности классов. Параллельная обработка ячеек обеспечивает высокое быстродействие, что критично для производственных задач с непрерывным потоком кадров.

Архитектура YOLO включает три последовательных блока: backbone извлекает признаки на разных масштабах; neck агрегирует их для устойчивого распознавания объектов различного размера; head по полученным признакам формирует итоговые предсказания.

За время развития семейство YOLO сменило несколько поколений. YOLOv8 остается одной из самых распространенных версий. В YOLOv9 реализован способ борьбы с потерями информации в глубоких сетях. В YOLO11 пересмотрена структура светочных блоков для улучшения баланса скорости и точности. В YOLO12 внедрены механизмы внимания, учитывающие глобальный контекст изображения и существенно повышающие точность детекции. В актуальной версии YOLO26 архитектура упрощена в пользу скорости обработки.

Обучение модели YOLO начинается с загрузки предобученных весов – этот подход (transfer learning) позволяет использовать уже выделенные визуальные признаки, что сокращает потребность в данных и времени при дообучении на целевом датасете. Далее начинается подбор гиперпараметров. Этот процесс носит итерационный характер и продолжается до тех пор, пока модель не достигает приемлемых значений.

Функция потерь YOLO состоит из трех компонентов: box loss (точность локализации рамок), cls loss (правильность классификации) и distribution focal loss (точность границ рамки через моделирование распределения вероятностей). Итоговая функция потерь – взвешенная сумма указанных компонент.

Аугментация данных – это важный шаг перед началом обучения. Суть метода состоит в применении различных преобразований к изображениям и их аннотациям. Особую роль аугментация играет тогда, когда датасет невелик и собрать дополнительные данные затруднительно. Преобразования искусственно увеличивают число обучающих примеров и повышают их разнообразие, тем самым снижая риск переобучения.

Качество моделей оценивали по стандартным метрикам детекции [18]. Precision – доля верных предсказаний среди всех предсказанных объектов; высокое значение указывает на редкие ложные срабатывания. Recall – доля найденных объектов среди всех реальных; высокое значение говорит о малом числе пропусков.

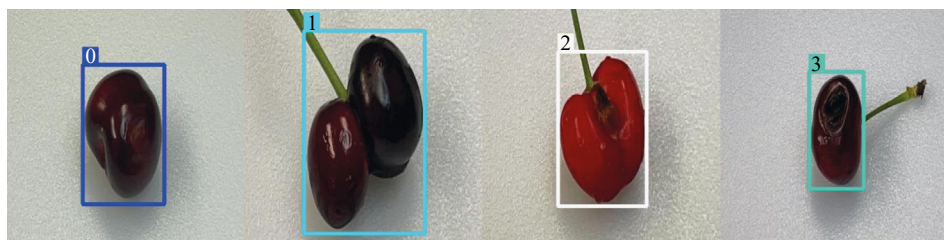


Рисунок 2. Изображение ягод вишни соответствующих классов

Figure 2. Cherries by grade



Обе метрики зависят от IoU – отношения площади пересечения предсказанной и истинной рамок к площади их объединения. mAP50 – средняя точность при пороге  $\text{IoU} \geq 0,50$  (предсказание считают верным при перекрытии не менее 50 %). mAP50-95 – среднее значение mAP по порогам IoU от 0,50 до 0,95 с шагом 0,05; эта метрика строже и отражает стабильность детекции при различных требованиях к точности локализации.

Обучение моделей выполнено на следующем программно-аппаратном комплексе: ОС Windows 10 (версия 10.0.19041), интерпретатор Python 3.8 (выбран из-за совместимости с библиотеками машинного обучения), облачная среда Google Colab с доступом к графическому процессору NVIDIA T4, хранилищем данных и поддержкой Jupyter Notebooks. Использование GPU существенно ускоряет матричные вычисления, лежащие в основе обучения нейронных сетей. Выбранный комплекс позволил эффективно реализовать полный цикл обучения и тестирования нейросетевых моделей.

### Результаты и их обсуждение

На этапе приемки сырья получено 530 собственных изображений (1024×1024 пикселя), чего оказалось недостаточно для полноценного обучения: малый объем выборки повышает риск переобучения. Для расширения датасета привлечены открытые изображения вишни с платформы Roboflow Universe. Собственные и сторонние изображения перемешаны случайным образом и размечены по целевым классам. Итоговый датасет составил более 1546 изображений с аннотациями (рис. 3).

Датасет разбивали на три выборки: обучающую (80 %), валидационную (10 %) и тестовую (10 %).

Обучающая служит для обновления весов, валидационная – для контроля качества и ранней остановки, тестовая – для финальной оценки на данных, не участвовавших в обучении.

Для повышения устойчивости модели к вариациям освещения, масштаба и ориентации объектов, характерным для производства, применены следующие преобразования:

1. Горизонтальное отражение с вероятностью 0,5.
2. Случайное изменение оттенка на 0,015.
3. Изменение насыщенности на 0,7.
4. Изменение яркости на 0,4.
5. Масштабирование на 0,5.
6. Мозаичная аугментация, при которой четыре изображения объединяются в одно.

Проведено сравнение пяти моделей YOLO (суффикс «m» указывает на средний размер архитектуры) в идентичных условиях: 50 эпох; размер батча 16; начальная скорость обучения 0,01; оптимизатор SGD с инерцией 0,937. Веса функции потерь: box loss – 7,5; cls loss – 0,5; distribution focal loss – 1,5. Итоговые метрики детекции по всем классам для каждой модели на тестовой выборке представлены в таблице 1.

Наилучшие результаты продемонстрировала модель YOLO12m; YOLO26m – наихудшие. Вероятно, это связано с тем, что YOLO26 ориентирована на упрощение архитектуры ради скорости, тогда как в YOLO12 сделан упор на механизмы внимания, повышающие точность.

Далее проведено сравнение версий YOLO12, различающихся количеством параметров и вычислительной сложностью (суффиксы: «n» – нано-, «s» – малый, «m» – средний размер). Обучение выполнено в идентичных условиях: 20 эпох; размер батча 16; оптимизатор SGD;



Рисунок 3. Примеры изображений из датасета

Figure 3. Examples of dataset images

Таблица 1. Сравнение метрик обученных моделей YOLO

Table 1. Metrics of trained YOLO models

| Модель  | Precision | Recall | mAP50  | mAP50-95 |
|---------|-----------|--------|--------|----------|
| YOLOv8m | 0,9256    | 0,8926 | 0,9543 | 0,8344   |
| YOLOv9m | 0,9211    | 0,9056 | 0,9569 | 0,8395   |
| YOLO11m | 0,9116    | 0,9119 | 0,9536 | 0,8390   |
| YOLO12m | 0,9141    | 0,9042 | 0,9563 | 0,8430   |
| YOLO26m | 0,8946    | 0,8865 | 0,9402 | 0,8253   |



начальная скорость 0,01; конечная – 0,0001 (косинусный планировщик); параметры аугментации – по умолчанию. Результаты на тестовой выборке приведены в таблице 2.

Увеличение размера модели повышает точность: YOLO12m показала лучшие результаты среди версий, YOLO12n – наихудшие. Рост числа параметров улучшает распознавание, но требует больших вычислительных затрат.

Затем на модели YOLO12m проведено сравнение восьми оптимизаторов в идентичных условиях: 20 эпох; размер батча 16; косинусный планировщик скорости; начальная скорость 0,01 для SGD и MuSGD; 0,001 для остальных; параметры аугментации – по умолчанию. Результаты на тестовой выборке приведены в таблице 3.

Лучшие результаты показал SGD, близкие – MuSGD; наихудшие – AdamW. SGD обеспечивает стабильную сходимость и эффективен для задач детекции.

Влияние размера батча исследовалось на модели YOLO12m при 20 эпохах, оптимизаторе SGD, начальной скорости 0,01, косинусном планировщике и параметрах аугментации по умолчанию. Протестировано четыре варианта; результаты на тестовой выборке приведены в таблице 4.

Лучшие результаты показал батч 16, наихудшие – батч 8. Увеличение размера батча до 16 оптимизирует оценку градиентов; дальнейшее увеличение не дает существенного прироста, поэтому батч 16 обеспечивает баланс точности и скорости.

Влияние коэффициента регуляризации Dropout исследовалось на модели YOLO12m при 20 эпохах,

батче 16, оптимизаторе SGD, начальной скорости 0,01, косинусном планировщике и параметрах аугментации по умолчанию. Протестировано пять значений Dropout; результаты на тестовой выборке приведены в таблице 5.

Изменение Dropout не повлияло на метрики: в фреймворке Ultralytics этот параметр активируется только для классификационных сетей, где применяется к регуляризирующим слоям. В архитектуре YOLO12m такие слои отсутствуют, поэтому переданное значение Dropout игнорируется при обучении и не отражается на результатах. Таким образом, неизменность показателей в таблице 5 обусловлена техническим ограничением, а не эффективностью регуляризации.

Финальное обучение YOLO12m выполнено с увеличенным до 50 числом эпох, батчем 16, оптимизатором SGD, начальной скоростью 0,01, конечной – 0,0001 (косинусный планировщик), отключением мозаичной аугментации за 20 эпох до завершения и ранней остановкой при отсутствии улучшений в течение 10 эпох; остальные параметры аугментации – по умолчанию (табл. 6).

Результаты финального обучения показали высокую точность модели: mAP50-95 достигла 0,8448. Модель корректно классифицирует все четыре категории ягод. Примеры детекции приведены на рисунке 4.

Достигнутые значения метрик, представленные в таблице 6, получены на тестовой выборке, сформированной

Таблица 2. Сравнение метрик обученных версий модели YOLO12

Table 2. Metrics of trained YOLO12 versions

| Модель  | Precision | Recall | mAP50  | mAP50-95 |
|---------|-----------|--------|--------|----------|
| YOLO12n | 0,8817    | 0,8771 | 0,9372 | 0,8069   |
| YOLO12s | 0,9170    | 0,8926 | 0,9537 | 0,8341   |
| YOLO12m | 0,9253    | 0,9049 | 0,9600 | 0,8436   |

Таблица 3. Сравнение метрик модели YOLO12m с различными оптимизаторами

Table 3. YOLO12m model metrics with different optimizers

| Оптимизатор | Precision | Recall | mAP50  | mAP50-95 |
|-------------|-----------|--------|--------|----------|
| Adam        | 0,9023    | 0,8948 | 0,9493 | 0,8290   |
| AdamW       | 0,8991    | 0,8802 | 0,9464 | 0,8268   |
| Adamax      | 0,9100    | 0,9069 | 0,9571 | 0,8392   |
| MuSGD       | 0,9251    | 0,9012 | 0,9586 | 0,8418   |
| NAdam       | 0,9092    | 0,8970 | 0,9528 | 0,8293   |
| RAdam       | 0,9065    | 0,9024 | 0,9530 | 0,8354   |
| RMSProp     | 0,9129    | 0,8930 | 0,9507 | 0,8323   |
| SGD         | 0,9253    | 0,9049 | 0,9600 | 0,8436   |

Таблица 4. Сравнение метрик модели YOLO12m с разным размером батча

Table 4. YOLO12m model metrics with different batch sizes

| Размер батча | Precision | Recall | mAP50  | mAP50-95 |
|--------------|-----------|--------|--------|----------|
| 8            | 0,9204    | 0,8995 | 0,9532 | 0,8366   |
| 12           | 0,9174    | 0,9026 | 0,9596 | 0,8404   |
| 16           | 0,9253    | 0,9049 | 0,9600 | 0,8436   |
| 20           | 0,9201    | 0,9027 | 0,9578 | 0,8428   |

Таблица 5. Сравнение метрик модели YOLO12m с разной величиной Dropout

Table 5. YOLO12m model metrics with different Dropout values

| Dropout | Precision | Recall | mAP50  | mAP50-95 |
|---------|-----------|--------|--------|----------|
| 0,10    | 0,9253    | 0,9049 | 0,9600 | 0,8436   |
| 0,15    | 0,9253    | 0,9049 | 0,9600 | 0,8436   |
| 0,20    | 0,9253    | 0,9049 | 0,9600 | 0,8436   |
| 0,25    | 0,9253    | 0,9049 | 0,9600 | 0,8436   |
| 0,30    | 0,9253    | 0,9049 | 0,9600 | 0,8436   |

Таблица 6. Значения метрик после финального обучения

Table 6. Metric values after final training

| Модель  | Precision | Recall | mAP50  | mAP50-95 |
|---------|-----------|--------|--------|----------|
| YOLO12m | 0,9034    | 0,9243 | 0,9562 | 0,8448   |



Рисунок 4. Определение ягод вишни на изображении

Figure 4. Visual identification of cherries

Таблица 7. Значения метрик финальной модели YOLO12m на выборке производственных изображений

Table 7. Final YOLO12m model: Metric values on the production image subset

| Модель  | Precision | Recall | mAP50  | mAP50-95 |
|---------|-----------|--------|--------|----------|
| YOLO12m | 0,8893    | 0,9019 | 0,9214 | 0,8124   |

рованной из объединенного датасета, включающего как производственные изображения, так и изображения из открытого источника. Такой состав соответствует общепринятой практике оценки моделей, обученных с расширением данных, и позволяет судить об общей способности модели распознавать ягоды различных категорий при вариативных условиях съемки. Для оценки применимости модели в реальном производстве проведена дополнительная валидация YOLO12m на 50 новых снимках с линии ООО «НПО Здоровое Питание» (Кемерово, Россия), собранных и размеченных по ранее описанной методике. Результаты приведены в таблице 7.

При тестировании модели исключительно на изображениях, полученных в производственных условиях, значения метрик несколько снижаются по сравнению с результатами на смешанной тестовой выборке, однако остаются на уровне, достаточном для практического применения.

На основе обученной модели разработана программа ЭВМ, направленная на регистрацию в Федеральный институт промышленной собственности (Москва, Россия). Программа предоставляет графический интерфейс для загрузки изображения ягод вишни и отображения результатов их классификации. Алгоритм работы представлен на рисунке 5.

Работа с программой начинается с выбора файла изображения. Для этого пользователь нажимает кнопку «Загрузка». Диалоговое окно позволяет выбрать файл с локального устройства. После загрузки изображение

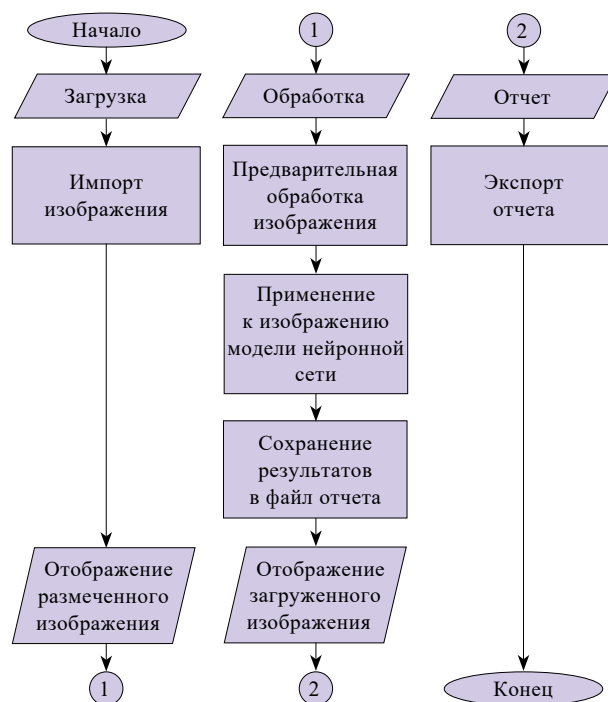


Рисунок 5. Алгоритм работы программы

Figure 5. Operation algorithm

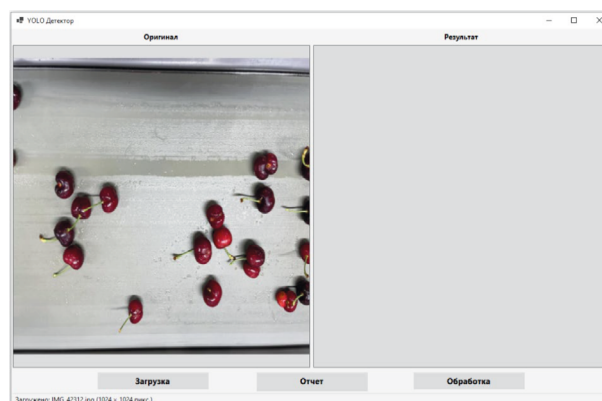


Рисунок 6. Интерфейс программы после загрузки изображения

Figure 6. Program interface after image loading

отображается в левой части окна программы (рис. 6), что позволяет проверить корректность выбранного файла перед анализом.

После нажатия кнопки «Обработка» программа передает изображение в модель YOLO12m, которая выполняет детекцию и возвращает результаты. Обработанное изображение с рамками и метками классов отображается в правой части окна (рис. 7). Результаты автоматически сохраняются в текстовый файл с указанием количества ягод каждого класса. Программа также сравнивает долю кондиционных и некондиционных

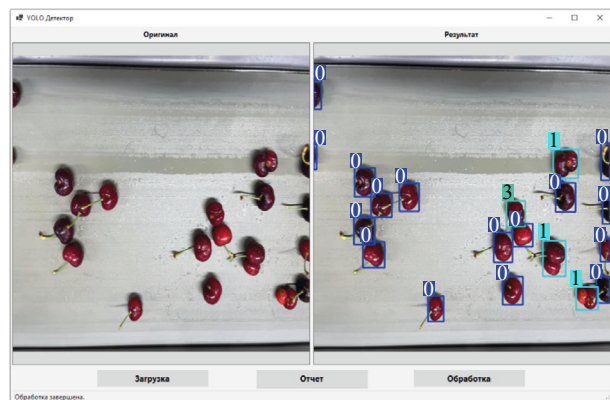


Рисунок 7. Интерфейс программы после обработки изображения

Figure 7. Program interface after image processing

ягод, определяет товарный сорт партии и формирует отчет, доступный для скачивания по кнопке «Отчет».

Программа разработана для цифровизации органолептической оценки внешнего вида сырья на этапе приемки. Ее применение снижает субъективность ручного контроля и сокращает время оценки партии. В перспективе программа может использоваться на непрерывных производствах для контроля соответствия сырья требованиям ГОСТ и технологических инструкций – в этом случае на вход будет подаваться видеопоток вместо отдельных изображений, что потребует адаптации архитектуры ПО. Данная задача относится к автоматизации производственных процессов и выходит за рамки настоящего исследования.

### Выводы

В ходе работы собран и подготовлен обучающий набор данных, состоящий из изображений ягод вишни четырех категорий качества, полученных в реальных производственных условиях на этапе приемки сырья. Все изображения размечены вручную в инструменте CVAT – каждой ягоде присвоена метка класса и ограничивающая рамка. Это позволило обучить модель самостоятельному распознаванию категорий без участия оператора.

Для детекции выбраны модели семейства YOLO. Проведено последовательное сравнение пяти версий (YOLOv8m, YOLOv9m, YOLO11m, YOLO12m и YOLO26m) и трех вариантов YOLO12 по размеру (nano, small и medium). Для YOLO12m выполнена

оптимизация гиперпараметров: сравнивались восемь оптимизаторов, четыре значения батча и пять значений параметра Dropout. Все конфигурации обучались в идентичных условиях с аугментацией данных и финальным тестированием на отдельной выборке.

По результатам сравнения пяти моделей преимущество продемонстрировала архитектура YOLO12m, показав наилучшие значения метрики mAP50-95 среди всех рассмотренных архитектур. Из всех оптимизаторов лучший результат дал SGD, оптимальный батч – 16. Проверка Dropout показала его неэффективность: в используемом фреймворке механизм регуляризации реализован только для классификационных задач, что учтено при интерпретации. Финальное обучение YOLO12m с увеличенным числом эпох повысило mAP50-95 до 0,8448; на производственной выборке значение составило 0,8124, что подтверждает применимость модели в реальных условиях.

На основе обученной модели разработана программа для ЭВМ. Оператор загружает снимок, программа передает его в модель, после обработки на экране отображается размеченное изображение с рамками и метками классов. Для работы с программой не требуется специальных знаний.

Исследование показало, что модели семейства YOLO пригодны для решения задачи классификации ягод вишни на этапе приемки сырья. YOLO12m уверенно распознает все четыре категории. Выявление некондиционных ягод до переработки снижает риск ухудшения качества готовой продукции. Предложенный подход обеспечивает стабильный и воспроизводимый результат, а также уменьшает время и трудозатраты на входной контроль.

### Критерии авторства

Авторы в равной степени участвовали в написании рукописи.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### Contribution

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

### Conflict of interest

The authors state that there is no conflict of interest.

### Список литературы / References

1. Шафрай А. В., Попов А. М., Косинов В. С., Резниченко И. Ю., Бондарчук О. Н. Применение сверточных нейронных сетей для контроля показателей технологического потока производства гранулированных киселей. Техника и технология пищевых производств. 2025. Т. 55. № 4. С. 845–855. [Shafrai AV, Popov AM, Kosinov VS, Reznichenko IYu, Bondarchuk ON. Convolutional neural networks in granulated kissel production. Food Processing: Techniques and Technology. 2025;55(4):845–855. (In Russ.)] <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2025-4-2613>

2. Daiaeddine MJ, Badrouss S, El Harti A, Bachaoui EM, Biniz M, *et al.* UAV imagery, advanced deep learning, and YOLOv7 object detection model in enhancing citrus yield estimation. *Foods and Raw Materials*. 2025;13(2):242–253. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2025-2-650>
3. Yavuzer E, Köse M, Uslu H. Determining the quality level of ready to-eat stuffed mussels with Arduino-based electronic nose. *Journal of Food Measurement and Characterization*. 2024;18:5629–5637. <https://doi.org/10.1007/s11694-024-02593-9>
4. Wijaya DR, Syarwan NF, Nugraha MA, Ananda D, Fahrudin T, *et al.* Seafood quality detection using electronic nose and machine learning algorithms with hyperparameter optimization. *IEEE Access*. 2023;11:62484–62495. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3286980>
5. Zlobin I, Sinelnikov A, Toroptsev N, Titov K, Antoshkina E, *et al.* Metal–organic frameworks at the tip of the e-tongue: Machine learning-driven disposable electrochemical sensors. *Journal of Materials Chemistry C*. 2025;13(23):11776–11788. <https://doi.org/10.1039/D5TC00965K>
6. Anisimov DS, Abramov AA, Gaidarzhi VP, Kaplun DS, Agina EV, *et al.* Food freshness measurements and product distinguishing by a portable electronic nose based on organic field-effect transistors. *ACS Omega*. 2023;8(5):4649–4654. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c06386>
7. Shuba A, Umarhkanov R, Bogdanova E, Anokhina E, Burakova I. Possibilities of an electronic nose on piezoelectric sensors with polycomposite coatings to investigate the microbiological indicators of milk. *Sensors*. 2024;24(11):3634. <https://doi.org/10.3390/s24113634>
8. Fedorov FS, Yaqin A, Krasnikov DV, Kondrashov VA, Ovchinnikov G, *et al.* Detecting cooking state of grilled chicken by electronic nose and computer vision techniques. *Food Chemistry*. 2021;345:128747. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128747>
9. Wu X, Xu B, Ma R, Niu Y, Gao S, *et al.* Identification and quantification of adulterated honey by Raman spectroscopy combined with convolutional neural network and chemometrics. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. 2022;274(1):121133. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2022.121133>
10. Lanjewar MG, Asolkar S, Parab JS, Morajkar PP. Detecting starch-adulterated turmeric using Vis-NIR spectroscopy and multispectral imaging with machine learning. *Journal of Food Composition and Analysis*. 2024;136:106700. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2024.106700>
11. Saha D, Senthilkumar T, Singh CHB, Manickavasagan A. Quantitative detection of metanil yellow adulteration in chickpea flour using line-scan near-infrared hyperspectral imaging with partial least square regression and one-dimensional convolutional neural network. *Journal of Food Composition and Analysis*. 2023;120:105290. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2023.105290>
12. Belugina R, Senchikhina A, Volkov S, Fedorov A, Legin A, *et al.* Quantification of phosphatides in sunflower oils using a potentiometric e-tongue. *Analytical Methods*. 2022;14(32):3064–3070. <https://doi.org/10.1039/D2AY00736C>
13. Sánchez CN, Orvañanos-Guerrero MT, Domínguez-Soberanes JU, Álvarez-Cisneros YEM. Analysis of beef quality according to color changes using computer vision and white-box machine learning techniques. *Heliyon*. 2023;9(7):e17976. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e17976>
14. Huang W, Wang X, Zhang JU, Xia J, Zhang X. Improvement of blueberry freshness prediction based on machine learning and multi-source sensing in the cold chain logistics. *Food Control*. 2023;145:109496. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2022.109496>
15. Anwar H, Anwar T, Murtaza SH. Review on food quality assessment using machine learning and electronic nose system. *Biosensors and Bioelectronics*. 2023;14:100365. <https://doi.org/10.1016/j.biosx.2023.100365>
16. Ксенофонов В. В. Нейронные сети. Проблемы науки. 2020. № 11. С. 28–29. [Ksenofontov VV. Neural networks. Problems of Science. 2020;(11):28–29. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/DTVJNS>
17. Sapkota R, Flores-Calero M, Qureshi R, Badgujar CH, Nepal U. YOLO advances to its genesis: A decadal and comprehensive review of the You Only Look Once (YOLO) series. *Artificial Intelligence Review*. 2025;58(9):274. <https://doi.org/10.1007/s10462-025-11253-3>
18. Mirzaei B, Nezamabadi-Pour H, Raoof A, Derakhshani R. Small object detection and tracking: A comprehensive review. *Sensors*. 2023;23(15):6887. <https://doi.org/10.3390/s23156887>

#### Дополнительная информация об авторах / Additional information about the authors

Попов Анатолий Михайлович / Anatoly M. Popov ORCID 0000-0003-0728-7211; eLIBRARY SPIN 6259-7555  
Шафрай Антон Валерьевич / Anton V. Shafrai ORCID 0000-0003-4512-1933; eLIBRARY SPIN 1840-5242  
Косинов Виталий Сергеевич / Vitaly S. Kosinov ORCID 0009-0005-5852-9809; eLIBRARY SPIN 8397-7880  
Подберезен Григорий Игоревич / Grigory I. Podberezen ORCID 0000-0003-4499-8426; eLIBRARY SPIN 8477-8514  
Сухоруков Дмитрий Викторович / Dmitry V. Sukhorukov ORCID 0000-0001-7995-3813; eLIBRARY SPIN 1595-7666  
Комаров Сергей Сергеевич / Sergey S. Komarov ORCID 0000-0002-1517-1596; eLIBRARY SPIN 2719-1509



<https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-3-2653>  
<https://elibrary.ru/EVAODC>

Оригинальная статья  
<https://fptt.ru>

## Крестьянские (фермерские) хозяйства России: анализ современного состояния и каналов сбыта фермерской продукции



Н. М. Сурай<sup>1,\*</sup>, С. В. Панасенко<sup>1</sup>,  
Е. А. Исаева<sup>2</sup>, Е. Ю. Соколова<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Российский экономический университет имени Г. В. Плеханова<sup>ROR</sup>, Москва, Россия

<sup>2</sup> Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации<sup>ROR</sup>, Москва, Россия

Поступила в редакцию: 07.06.2026

Принята после рецензирования: 23.07.2026

Принята к публикации: 04.08.2026

\*e-mail: [natalya.mixajlovna.1979@mail.ru](mailto:natalya.mixajlovna.1979@mail.ru)

© Н. М. Сурай, С. В. Панасенко, Е. А. Исаева,  
Е. Ю. Соколова, 2026



### Аннотация.

Эффективное развитие крестьянских (фермерских) хозяйств и каналов сбыта их продукции является значимым фактором обеспечения продовольственной безопасности России. Цель исследования – проанализировать современное состояние крестьянских (фермерских) хозяйств России и каналов сбыта фермерской продукции, а также обобщить опыт развития агроагрегаторов на примере Волгоградской области.

Объекты исследования – крестьянские (фермерские) хозяйства России, агроагрегаторы и каналы сбыта фермерской продукции. В работе применены методы систематизации, обобщения, группировки и статистической обработки данных.

Фермеры обеспечивают около 14,0 % валовой сельхозпродукции страны; в 2025 г. объем производства крестьянских (фермерских) хозяйств и индивидуальных предпринимателей достиг 1 518,5 млрд руб., что на 14,4 % выше уровня 2024 г. Наибольшее число хозяйств сосредоточено в Южном, Приволжском и Северо-Кавказском федеральных округах. Рассмотрена роль агроагрегаторов в решении проблем сбыта: представлено их распределение по регионам, проанализирован опыт Волгоградской области, а также приведена характеристика основных агрегаторов региона. Перспективные каналы сбыта включают традиционные рынки, кооперативные структуры, цифровые платформы, маркетплейсы и агротуризм.

Результаты исследования могут быть использованы при разработке подходов к развитию системы сбыта фермерской продукции в условиях цифровизации аграрного сектора.

**Ключевые слова.** Продовольственная безопасность, цифровизация, крестьянские (фермерские) хозяйства, агроагрегаторы, продукция сельского хозяйства, каналы сбыта, торговые сети, инфраструктура

**Для цитирования:** Сурай Н. М., Панасенко С. В., Исаева Е. А., Соколова Е. Ю. Крестьянские (фермерские) хозяйства России: анализ современного состояния и каналов сбыта фермерской продукции. Техника и технология пищевых производств. 2026. Т. 56. № 3. С. 526–542. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-3-2653>

## Smallholder Farms in Russia: Status and Sales Channels



Natalya M. Suray<sup>1,\*</sup>, Svetlana V. Panasenko<sup>1</sup>,  
Ekaterina A. Isaeva<sup>2</sup>, Elena Yu. Sokolova<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Plekhanov Russian University of Economics, Moscow, Russia

<sup>2</sup> Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, Russia

Received: 07.06.2026  
Revised: 23.07.2026  
Accepted: 04.08.2026

\*e-mail: [natalya.mixajlovna.1979@mail.ru](mailto:natalya.mixajlovna.1979@mail.ru)  
© N.M. Suray, S.V. Panasenko, E.A. Isaeva, E.Y. Sokolova, 2026



### Abstract.

Smallholder farms and their product distribution channels are important components of Russia's food security. This article describes the current state of commercial family farms in Russia and their distribution channels, summarizing the experience of agricultural aggregators in the Volgograd Region.

The research focused on smallholder farms, agricultural aggregators, and farm product distribution channels. The data were subjected to standard research and statistical processing methods.

Small farms account for approximately 14.0% of the national gross agricultural output. In 2025, the output of smallholder farms and individual entrepreneurs reached 1,518.5 billion rubles, which was by 14.4% higher than in 2024. Farms concentrate mostly in the Southern, Volga, and North Caucasus Federal Districts. Agricultural aggregators were studied for their role in addressing marketing challenges and distributed by region. The comprehensive analysis of aggregators in the Volgograd Region showed that traditional markets, cooperatives, digital platforms, marketplaces, and agritourism remain effective distribution channels.

These findings can be applied to develop efficient distribution systems for farm products amid the digitalization of the agricultural sector.

**Keywords.** Food security, digitalization, smallholder farms, agricultural aggregators, agricultural products, distribution channels, retail chains, infrastructure

**For citation:** Suray NM, Panasenko SV, Isaeva EA, Sokolova EYu. Smallholder Farms in Russia: Status and Sales Channels. Food Processing: Techniques and Technology. 2026;56(3):526–542. (In Russ.) <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-3-2653>

### Введение

Обеспечение населения РФ безопасной, качественной и доступной сельскохозяйственной продукцией – одна из стратегических целей Доктрины продовольственной безопасности. На XXXVII съезде Ассоциации крестьянских (фермерских) хозяйств и сельскохозяйственных кооперативов (АККОР) (Казань, Россия) Президент России В. В. Путин отметил, что «фермеры успешно трудятся во всех сферах отечественного агропромышленного комплекса, активно внедряют инновационные технологии и эффективные модели сельскохозяйственной кооперации, вносят значительный вклад в обеспечение продовольственной безопасности страны. Фермеры также активно принимают участие в решении актуальных социальных проблем, многое делают для развития сельских территорий и повышения качества жизни россиян». В структуре рыночной экономики, как показывает отечественный и зарубежный опыт, важная роль в производстве сельскохозяйственной продукции и увеличении доходов сельского населения принадлежит малым формам хозяйствования. И. П. Чупина и др. [1] акцентируют

внимание на позиции А. В. Чайнова, который подчеркивает, что «путь к повышению эффективности и инновационному развитию сельского хозяйства в России лежит через увеличение и укрепление фермерских хозяйств, их поддержку на государственном уровне, а также их объединение в производственные и потребительские кооперативы. Кооперация позволяет крестьянским хозяйствам совместно решать проблемы с производством, хранением, переработкой и сбытом сельскохозяйственной продукции, с закупкой сельскохозяйственной техники и оборудования, семян, племенного скота и т. д.».

Академик РАН А. В. Петриков отмечает, что «семейные фермерские хозяйства в экономике и жизни общества выполняют важнейшие экономические, социальные, демографические функции» [2]. По его мнению, основная их роль заключается в обеспечении продовольственной безопасности, особенно в отношении трудоемких органических продуктов. В период кризисов они играют важную роль в продовольственном снабжении отдаленных и труднодоступных регионов, способствуют занятости, повышению доходов

населения, демографическому росту, а также сохранению сельских территорий.

Согласно исследованию М. Abraham *et al.* [3], быстрое повышение производительности мелких фермерских хозяйств – основной механизм сокращения бедности в сельских территориях. Это подтверждается опытом «зеленой революции» в Азии и последними успехами стран Африки к югу от Сахары. Экономическая политика, ориентированная на интересы мелких фермеров, непосредственно содействует достижению целей устойчивого развития сельских территорий, направленных на искоренение голода, обеспечение продовольственной безопасности и поддержку устойчивого сельского хозяйства. Предшествующие усилия по повышению производительности мелких фермерских хозяйств сосредоточены на основных зерновых культурах; в будущем необходимо учитывать системный подход к обеспечению продовольственной безопасности и поощрять диверсификацию в сторону богатых питательными веществами бобовых, зерновых и садоводческих культур, а также животноводства. Инвестиции в инфраструктуру сельских рынков позволяют мелким фермерам коммерциализировать и увеличивать поставки скоропортящихся продуктов. Включение небольших фермерских хозяйств в городские цепочки создания стоимости продуктов питания также является новым направлением для сокращения бедности в сельской местности.

Сектор малого агробизнеса демонстрирует устойчивую динамику развития, внося существенный вклад в продовольственную стабильность России. За последние пять лет российские крестьянские (фермерские) хозяйства (К(Ф)Х) увеличили объемы производства продукции почти на треть. На долю малых форм хозяйствования приходится половина совокупного объема производства сельскохозяйственной продукции в стране. В отдельных регионах России этот показатель достигает 80 %, что свидетельствует о стратегической важности фермерского движения для региональных экономик. Наряду с продовольственным обеспечением фермеры выполняют важную социально-экономическую функцию: создают рабочие места на селе, способствуют развитию локальных брендов и обеспечивают региональные рынки продукцией [4].

В Индии под мелкими фермерами понимаются хозяйства, владеющие обрабатываемой землей площадью от 1 до 2 га. На долю индийского сектора садоводства приходится около 33 % валовой добавленной стоимости сельского хозяйства, оказывая существенное влияние на национальную экономику. Наряду с обеспечением продовольственной безопасности страны фермерские хозяйства предоставляют альтернативные возможности трудоустройства в сельской местности, диверсифицируют сельскохозяйственную деятельность и повышает доходы производителей.

В рамках федерального проекта «Развитие малого агробизнеса», действующего с 1 января 2026 г., кон-

солидированные меры поддержки для малых форм разделены на пять приоритетных направлений: развитие фермерских хозяйств, малых агропроизводителей, сельского туризма, сельскохозяйственных потребительских кооперативов и инфраструктуры сбыта фермерской продукции.

Несмотря на значительный потенциал, многие фермеры сталкиваются с трудностями, обусловленными слабым управлением, ограниченным доступом к ресурсам и рыночным барьерам, что ведет к снижению эффективности работы. Проблемы малых форм хозяйствования включают несколько основных блоков. Один из наиболее значимых – сбыт сельскохозяйственной продукции. Существующая в России система логистики и сбыта сельхозпродукции устроена таким образом, что мелкие производители оказываются неконкурентоспособными, а крупные кооперативы, которые могли бы соперничать с ведущими поставщиками (включая зарубежных), практически отсутствуют<sup>1</sup>. Можно выделить причины, по которым малый производитель оказывается неконкурентоспособным в существующих логистических цепочках:

1. Значительные логистические расходы. Ключевая проблема – стремительный рост стоимости транспортных услуг. Постоянное повышение цен на горючее, комплектующие детали и техническое обслуживание приводит к тому, что затраты на доставку составляют значительную долю дохода, лишая фермеров средств для покрытия базовых издержек. Наиболее острая ситуация складывается у фермерских хозяйств, находящихся в отдаленных регионах с недостаточно развитой транспортной инфраструктурой. Согласно ФЗ от 28 ноября 2025 г. № 426-ФЗ «О федеральном бюджете на 2026 год и на плановый период 2027 и 2028 годов», в 2026 г. на финансовое обеспечение субсидий из федерального бюджета российским организациям в целях компенсации части затрат на транспортировку сельскохозяйственной и продовольственной продукции, в соответствии с решением о порядке предоставления субсидии от 15 января 2025 г. № 25-61831-02052-Р, предусмотрены бюджетные средства в размере 15 000,0 млн руб.

2. Сложности со сбытом продукции. Фермеры нередко испытывают трудности при налаживании прямых контактов с конечными потребителями. Розничные сети диктуют жесткие условия, требуя гарантированной стабильности поставок, безупречного качества товаров и крупных объемов. Небольшим хозяйствам сложно соответствовать таким высоким стандартам из-за дефицита ресурсов – финансовых, кадровых и временных. В результате возможности мелких фермеров по выходу на организованный рынок

<sup>1</sup> Малому агробизнесу оформят отдельную поддержку. В 2026 году Минсельхоз планирует запустить новый федеральный проект. URL: <https://www.agroinvestor.ru/markets/article/44767-malomu-agrobiznesu-oformyat-otdelnuyu-podderzhku-v-2026-godu-minselkhoz-planiruet-zapustit-novyy-fed/> (дата обращения 28.05.2026).

сбыта оказываются ограниченными, что усиливает их зависимость от торговых посредников [5].

3. Слабое развитие инфраструктуры хранения и предпродажной подготовки фермерской продукции.

4. Нестабильность производства и сопутствующие риски. Неблагоприятные климатические условия могут резко снизить урожайность, что непосредственно сказывается на объеме продукции, доступной для реализации. Возникает ситуация неопределенности: наличие товара сегодня не гарантирует его достаточного объема для выполнения контрактных обязательств завтра. Подобные колебания производственных объемов дополнительно дестабилизируют логистические цепочки и финансовые потоки.

5. Низкий уровень технологической и цифровой оснащенности. Значительная часть фермерских хозяйств не располагает финансовыми возможностями для внедрения передовых логистических инструментов: систем управления складскими запасами (WMS), транспортных менеджмент-систем (TMS) и цифровых сервисов прогнозирования потребительского спроса. В результате процессы утрачивают прозрачность и контролируемость, что ведет к росту числа ошибок и материальных потерь.

6. Дисбаланс сил в цепочке поставок. В логистических сетях преобладают крупные торговые посредники или розничные сети, способные устанавливать свои условия. Их доминирующее положение обеспечивает переговорное преимущество, позволяя откладывать платежи поставщикам или требовать дополнительных комиссий, которые зачастую не покрывают реальные затраты производителей. Данная ситуация формирует замкнутый цикл: возросшие расходы сокращают прибыль, лишая фермеров средств для инвестиций в модернизацию качества продукции и логистических процессов.

7. Внешние макроэкономические риски. Сельскохозяйственный сектор испытывает давление как со стороны внутренних, так и внешних факторов. К их числу относятся волатильность цен на мировых рынках сырья, изменение конъюнктуры международной торговли и сбои в логистических цепочках. Необходимость постоянной адаптации к изменяющимся глобальным условиям требует значительных ресурсных затрат, что неизбежно снижает эффективность основной производственной деятельности аграриев.

Повысить конкурентоспособность фермеров позволят следующие механизмы преодоления перечисленных барьеров:

- прямые закупки топлива у нефтеперерабатывающих заводов или через биржи: заключение долгосрочных договоров с поставщиками и участие в коллективных закупках снижают зависимость от краткосрочных колебаний цен;
- оптимизация логистики: выбор наиболее эффективных маршрутов и использование аналитических инструментов для прогнозирования спроса;

– развитие прямых каналов сбыта: фермерских рынков, собственных интернет-магазинов или сотрудничества с локальными точками продаж – это позволит снизить зависимость от крупных сетей. В сентябре 2022 г. Совет Федерации запустил пилотные проекты агроагрегаторов при координации Минпромторга и Минсельхоза. Агроагрегаторы объединяют урожай фермеров и предоставляют им возможность выхода на полки торговых сетей. На сегодняшний день не менее 81 организации, агрегирующей фермерскую продукцию, действуют в 45 регионах. Агроагрегаторы, являющиеся сельскохозяйственными потребительскими кооперативами или организациями с долей сельхозпроизводителей не менее 51 % акций, могут претендовать на государственную поддержку;

– включение опыта создания и организации работы межфермерских оптово-распределительных центров (ОРЦ). Показательный пример – Новгородская область, где на базе местного фермерского кооператива запустили ОРЦ для работы с картофелем и овощами. Такие центры могут стать устойчивой платформой для объединения крестьянских хозяйств на кооперативной или контрактной основе и вовлечения их в сложные агропромышленные формирования. Содействуя реализации продукции К(Ф)Х по более высоким гарантированным ценам благодаря предпродажной подготовке, ОРЦ способствуют росту доходов фермеров. Кроме того, они вовлекают К(Ф)Х и личные подсобные хозяйства в решение задач импортозамещения и повышают объемы производства и товарность продукции;

– использование доступного льготного кредитования. Россельхоз банк увеличивает кредитование малого агробизнеса: за последние десять лет выдачи фермерам ежегодно растут на 20 %. Кредитный портфель банка за этот период вырос в три раза – до 188 млрд руб.;

– инвестиции в цифровые технологии для повышения производительности труда;

– активное участие в отраслевых инициативах: сотрудничество с другими хозяйствами для совместного решения логистических задач и лоббирование интересов малого агробизнеса на государственном уровне.

Г. М. Гриценко [6] обращает внимание на то, что малые хозяйства не обладают ни трудовыми ресурсами для диверсификации производства, ни навыками организации сбыта, переговоров, транспортировки и предпродажной подготовки, что делает их особенно зависимыми от внешних сбытовых услуг.

Сбыт сельскохозяйственной продукции сопряжен с трудностями из-за ее высокой скоропортящейся способности, поэтому выбор эффективного канала сбыта имеет решающее значение для повышения рентабельности и доходов фермерских хозяйств. Н. Das *et al.* [7] изучали эффективность каналов сбыта для садоводческих культур и факторы, определяющие выбор фермерами этих каналов. По результатам исследований установлено, что прямой маркетинг – наиболее эффективный канал, но наименее предпочтительный для фер-



меров. Чтобы активизировать участие фермеров в прямом маркетинге, необходимо оперативно разработать и внедрить политику по популяризации мобильных технологий в маркетинге и сельском хозяйстве, создать удобные приложения или веб-сайты для сбыта продукции, внедрить доступные кредитные системы и развить сельскую инфраструктуру – холодильные склады, рыночные объекты, дороги и транспортную сеть.

Цель исследования – проанализировать современное состояние К(Ф)Х в России и каналов сбыта фермерской продукции, а также обобщить опыт развития агроагрегаторов на примере Волгоградской области.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- проанализировать современное состояние К(Ф)Х и индивидуальных предпринимателей (ИП) в России, в т. ч. в разрезе федеральных округов;
- оценить основные показатели развития К(Ф)Х и ИП;
- исследовать систему сбыта фермерской продукции и возможности ее использования К(Ф)Х и ИП;
- дать характеристику агроагрегаторам Волгоградской области.

#### Объекты и методы исследования

Объекты исследования – крестьянские (фермерские) хозяйства (К(Ф)Х) России в разрезе следующих показателей: средняя площадь сельскохозяйственных угодий на одно хозяйство, структура производства продукции сельского хозяйства и структура производства основных видов сельскохозяйственной продукции; количество агроагрегаторов в России, в т. ч. в региональном и федеральном разрезе, а также каналы сбыта фермерской продукции.

Предметом исследования выступают региональные особенности функционирования фермерских хозяйств, позволяющие добиваться результатов в сфере сбыта фермерской продукции.

Информационную базу исследования составили: официальные сайты Федеральной службы государственной статистики (Росстат) – для получения сведений об основных показателях деятельности К(Ф)Х и индивидуальных предпринимателей, объемах производства продукции сельского хозяйства, а также демографической ситуации в регионах; интернет-порталы Ассоциации К(Ф)Х и сельскохозяйственных коопера-

тивов России, а также Ассоциации «Народный фермер» – как источники актуальной информации о текущем состоянии и тенденциях развития К(Ф)Х; научные статьи по тематике исследования, опубликованные за период 2020–2026 гг. в ведущих отраслевых журналах и содержащие мнения компетентных экспертов по рассматриваемой проблематике.

В ходе исследования применяли методы систематизации и обобщения. Считается, что указанные методы обеспечивают достаточную достоверность полученных результатов. Информационную базу дополнили материалы интервью с руководителями К(Ф)Х исследуемых территорий; это позволило выявить специфику ведения хозяйства в современных условиях, оценить реальные проблемы и возможности сбыта фермерской продукции.

Для сбора эмпирического материала выполнен систематический поиск в академических базах данных – Scopus и Google Scholar – с использованием ключевых слов: фермерские хозяйства, определяющие факторы, эффективность, сельское хозяйство, сбыт фермерской продукции.

#### Результаты и их обсуждение

На долю малых форм хозяйствования в РФ приходится около половины совокупного объема производства сельскохозяйственной продукции; в отдельных регионах этот показатель достигает 80 %. По итогам 2025 г. доля фермерских хозяйств в общем объеме производства продукции сельского хозяйства составила 14,3 %, при этом к 2030 г. планируется увеличить ее до 30,0 % (табл. 1) [8]. В развитых странах небольшие фермерские хозяйства обеспечивают до 80 % производства продуктов питания, что стало возможным благодаря развитию централизованных каналов сбыта фермерской продукции.

Расширение посевных площадей крестьянских (фермерских) хозяйств (К(Ф)Х) и индивидуальных предпринимателей (ИП) оказало влияние на структуру посевов. Данная категория сельхозпроизводителей продолжает демонстрировать высокие результаты в производстве зерновых и зернобобовых культур, а также масличных (подсолнечника на зерно), обеспечивая более трети общего производства в стране. С 2021 г. отмечается рост производства волокна льна-долгунца на 9,7 п.п. –

Таблица 1. Структура производства продукции сельского хозяйства по категориям хозяйств в России, % от общего объема производства в фактически действовавших ценах [8]

Table 1. Structure of agricultural production by farm category in Russia, % of total production volume at current prices [8]

| Категория                                                            | 2021 г. | 2022 г. | 2023 г. | 2024 г. | 2025 г. |
|----------------------------------------------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Хозяйства всех категорий                                             | 100,0   | 100,0   | 100,0   | 100,0   | 100,0   |
| Сельскохозяйственные организации                                     | 59,5    | 60,1    | 59,9    | 60,4    | 61,0    |
| Хозяйства населения                                                  | 25,1    | 24,1    | 25,3    | 25,4    | 24,7    |
| Крестьянские (фермерские) хозяйства и индивидуальные предприниматели | 15,4    | 15,8    | 14,8    | 14,2    | 14,3    |

с 24,4 % в 2020 г. до 34,1 % в 2024 г. Увеличение доли К(Ф)Х и ИП в производстве отдельных видов растениеводческой продукции по сравнению с 2015 г. также фиксируется по зерновым и зернобобовым культурам, подсолнечнику на зерно, картофелю и овощам. В то же время наблюдается сокращение доли в производстве сахарной свеклы. КФХ играют значительную роль в производстве овощей открытого грунта, картофеля, молока и ягод, а также в сегменте разведения мелкого рогатого скота – по этим направлениям доля малого агробизнеса в общей структуре производства превышает 65 %. Согласно данным Росстата, в 2025 г. доля К(Ф)Х и ИП в производстве зерна составила 29,4 % от общего сбора в хозяйствах всех категорий (в 2024 г. – 30,2 %), сахарной свеклы – 10,8 % (в 2024 г. – 11,4 %), подсолнечника – 40,8 % (в 2024 г. – 38,9 %) (табл. 2) [8].

В 2025 г. объем валовой продукции сельского хозяйства, произведенной К(Ф)Х и ИП, составил 1 518,5 млрд руб., что на 14,4 % больше показателя 2024 г. (табл. 3) [8]; по сравнению с 2021 г. этот объем вырос на 28,3 %. Индекс физического объема продукции за последние пять лет демонстрирует значительные колебания. В 2025 г. его значение составило 106,4 %, что на 11,7 п.п. выше уровня 2024 г. До 2024 г. наблюдался устойчивый рост физического объема производства продукции, однако темпы этого измене-

ния были неравномерными: среднее значение индекса за период 2021–2025 гг. составило 104,9 %. Динамика производства в К(Ф)Х и ИП служит индикатором изменения их доли в общем объеме валовой продукции сельского хозяйства, которая в 2025 г. достигла 14,3 %. По сравнению с 2021 и 2024 гг. удельный вес этих форм производителей в 2025 г. сократился на 1,1 и 0,1 п.п. соответственно.

Самый большой вклад в производство продукции сельского хозяйства внес Центральный федеральный округ (ФО) – 28,6 %. На долю Приволжского ФО пришлось 24,6 % от общего объема, Южный ФО обеспечил 14,5 % производства, Сибирский ФО – 10,4 %, Северо-Кавказский ФО – 9,0 %, Уральский ФО – 5,1 %, Северо-Западный ФО – 4,5 %, Дальневосточный ФО – 3,4 %. В пятерку регионов-лидеров по вкладу в общероссийское производство сельхозпродукции по итогам 2025 г. вошли Краснодарский край, Ростовская область, Республика Татарстан, Воронежская и Ярославская области.

Лидером по объему производства продукции сельского хозяйства в категории К(Ф)Х и ИП выступает Южный ФО с показателем 362 038 млн руб. по итогам 2025 г. Доля К(Ф)Х и ИП в структуре производства Южного ФО традиционно высока и составляет 23,5 % среди всех федеральных округов.

Таблица 2. Структура производства отдельных видов сельскохозяйственной продукции по категориям хозяйств в России в 2021–2025 гг., % [8]

Table 2. Structure of production of selected agricultural products by farm category in Russia, 2021–2025, % [8]

| Наименование                                                         | 2021 г. | 2022 г. | 2023 г. | 2024 г. | 2025 г. |
|----------------------------------------------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Сельскохозяйственные организации                                     |         |         |         |         |         |
| Зерновые и зернобобовые культуры                                     | 68,6    | 68,7    | 68,2    | 68,6    | 69,3    |
| Картофель                                                            | 22,6    | 23,0    | 25,8    | 24,4    | 26,5    |
| Овощи                                                                | 29,4    | 31,2    | 30,5    | 30,9    | 30,2    |
| Семена подсолнечника                                                 | 63,6    | 61,3    | 61,4    | 60,8    | 58,8    |
| Плоды и ягоды                                                        | 30,6    | 35,3    | 38,2    | 38,1    | 38,9    |
| Молоко                                                               | 56,2    | 57,7    | 59,4    | 60,9    | 62,9    |
| Скот и птица на убой (в живом весе)                                  | 78,1    | 79,6    | 80,5    | 81,4    | 82,3    |
| Крестьянские (фермерские) хозяйства и индивидуальные предприниматели |         |         |         |         |         |
| Зерновые и зернобобовые культуры                                     | 30,3    | 30,2    | 30,8    | 30,2    | 29,4    |
| Картофель                                                            | 14,2    | 15,6    | 16,8    | 16,5    | 17,0    |
| Овощи                                                                | 21,0    | 22,3    | 23,9    | 23,6    | 23,8    |
| Семена подсолнечника                                                 | 36,0    | –       | 38,2    | 38,9    | 40,8    |
| Плоды и ягоды                                                        | 4,8     | 5,0     | 7,2     | 9,2     | 9,8     |
| Молоко                                                               | 9,1     | 9,0     | 8,9     | 8,5     | 8,1     |
| Скот и птица на убой (в живом весе)                                  | 3,9     | 3,8     | 3,8     | 3,8     | 3,7     |
| Хозяйства населения                                                  |         |         |         |         |         |
| Зерновые и зернобобовые культуры                                     | 1,1     | 1,1     | 1,0     | 1,2     | 1,8     |
| Картофель                                                            | 63,2    | 61,4    | 57,4    | 59,1    | 56,5    |
| Овощи                                                                | 49,6    | 46,5    | 45,6    | 45,5    | 46,0    |
| Семена подсолнечника                                                 | 0,4     | 0,4     | 0,4     | 0,3     | 0,4     |
| Плоды и ягоды                                                        | 64,6    | 59,7    | 54,6    | 52,7    | 56,0    |
| Молоко                                                               | 34,7    | 33,3    | 31,8    | 34,7    | 29,0    |
| Скот и птица на убой (в живом весе)                                  | 18,0    | 16,6    | 15,7    | 14,8    | 14,0    |

Таблица 3. Объем и структура производства продукции сельского хозяйства в России и федеральных округах (ФО) в 2025 г. в фактически действовавших ценах [8]

Table 3. Volume and structure of agricultural production in Russia and across federal districts (ФО) in 2025 (current prices) [8]

| Территория           | Хозяйства всех категорий, млн руб. | Сельскохозяйственные организации |      | Крестьянские (фермерские) хозяйства | Индивидуальные предприниматели | Личные подсобные хозяйства |      |
|----------------------|------------------------------------|----------------------------------|------|-------------------------------------|--------------------------------|----------------------------|------|
|                      |                                    | млн руб.                         | %    |                                     |                                | млн руб.                   | %    |
| Россия               | 10 627 548,0                       | 6 482 804,3                      | —    | 1 519 739,4                         | —                              | 2 625 004,3                | —    |
| Центральный ФО       | 3 040 159,2                        | 2 350 043,1                      | 77,3 | 255 373,4                           | 8,4                            | 434 742,8                  | 14,3 |
| Северо-Западный ФО   | 481 135,5                          | 372 880,0                        | 77,5 | 23 575,6                            | 4,9                            | 84 679,8                   | 17,6 |
| Южный ФО             | 1 540 587,3                        | 790 321,3                        | 51,3 | 362 038,0                           | 23,5                           | 388 228,0                  | 25,2 |
| Северо-Кавказский ФО | 952 272,2                          | 354 245,3                        | 37,2 | 144 745,4                           | 15,2                           | 453 281,6                  | 47,6 |
| Приволжский ФО       | 2 613 273,7                        | 1 481 726,2                      | 56,7 | 389 377,8                           | 14,9                           | 742 169,7                  | 28,4 |
| Уральский ФО         | 535 778,8                          | 334 326,0                        | 62,4 | 61 078,8                            | 11,4                           | 140 374,0                  | 26,2 |
| Сибирский ФО         | 1 104 562,2                        | 625 182,2                        | 56,6 | 184 461,9                           | 16,7                           | 294 918,1                  | 26,7 |
| Дальневосточный ФО   | 360 057,0                          | 160 225,4                        | 44,5 | 62 650,0                            | 17,4                           | 137 181,7                  | 38,1 |

Таблица 4. Основные показатели деятельности крестьянских (фермерских) хозяйств и индивидуальных предпринимателей в 2021–2025 гг.

Table 4. Key performance indicators of smallholder farms and individual entrepreneurs in 2021–2025

| Показатель                                                                                                                                | 2021 г. | 2022 г. | 2023 г. | 2024 г. | 2025 г. | В среднем за 2021–2025 гг. | Отношение 2025 г. к 2024 г., % |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|----------------------------|--------------------------------|
| Количество крестьянских (фермерских) хозяйств и индивидуальных предпринимателей, тыс. ед.                                                 | 262,1   | 263,1   | 256,9   | 284,2   | 300,2   | 273,3                      | 105,6                          |
| Валовая продукция, млрд руб.                                                                                                              | 1 184,1 | 1 350,4 | 1 257,2 | 1 327,8 | 1 518,5 | 1 327,6                    | 120,8                          |
| Прирост валовой продукции, %                                                                                                              | 122,8   | 114,0   | 93,1    | 105,6   | 114,4   | 110,0                      | —                              |
| Индекс изменения физического объема производства продукции сельского хозяйства в денежном выражении, %                                    | 101,7   | 121,4   | 100,3   | 94,7    | 106,4   | 104,9                      | —                              |
| Удельный вес крестьянских (фермерских) хозяйств и индивидуальных предпринимателей в общем объеме валовой продукции сельского хозяйства, % | 15,4    | 15,8    | 14,8    | 14,2    | 14,3    | 14,9                       | —                              |
| Площадь селхозугодий в крестьянских (фермерских) хозяйствах, млн га                                                                       | 20,2    | 20,3    | 20,7    | 20,4    | 20,6    | 20,5                       | 101,0                          |
| Посевные площади, млн га                                                                                                                  | 25,4    | 26,3    | 26,2    | 25,9    | 25,4    | 25,8                       | 97,7                           |
| Средний размер земельного участка крестьянского (фермерского) хозяйства, га                                                               | 103,2   | 100,0   | 98      | 109,7   | 99      | 102,0                      | 90,2                           |

Крестьянские хозяйства сохраняют статус одного из основных производителей сельскохозяйственной продукции. По данным Росреестра, на 1 января 2024 г. в России насчитывалось 284 200 К(Ф)Х. На сегодняшний день по числу действующих К(Ф)Х и ИП занимают лидирующие положения: Москва – 513 371 ед.; Московская область – 368 033 ед.; Краснодарский край – 259 020 ед.; Санкт-Петербург – 239 785 ед.; Ростовская область – 152 937 ед.; Свердловская область – 145 781 ед.; Республика Татарстан – 124 963 ед.

В 2025 г. площадь сельскохозяйственных угодий на одно К(Ф)Х и ИП составила 99 га [8]. По сравнению с 2024 г. общая площадь земельных участков К(Ф)Х сократилась на 278,7 тыс. га несмотря на увеличение общего числа хозяйств на 22,1 тыс. При этом количество К(Ф)Х и ИП в 2025 г. относительно 2021 г. выросло на 14,5 % (табл. 4).

В настоящее время в фермерских хозяйствах увеличиваются площади обрабатываемой земли и поголовье скота – это положительный тренд для развития

сельского хозяйства. В 2025 г. посевная площадь под сельскохозяйственными культурами в К(Ф)Х и ИП сократилась на 2,3 % по сравнению с 2024 г. – с 25,8 до 25,4 млн га [8]. В период с 2021 по 2025 г. посевные площади К(Ф)Х и ИП выросли на 0,4 п.п. благодаря перераспределению земель от сельскохозяйственных организаций и хозяйств населения. Одновременно отмечается существенное сокращение посевов зерновых и зернобобовых культур на 0,795 тыс. га в пользу более маржинальных сельскохозяйственных культур. Площади под техническими культурами незначительно увеличились – на 542 тыс. га. Российские аграрии смещают акцент с зерновых на масличные культуры ввиду их более высокой маржинальности.

Анализ позволяет выделить две основные модели устойчивого роста посевных площадей в России. Первая – быстрый рост в регионах с небольшой базой, где активно осваиваются новые площади. Вторая – более сдержанное, но масштабное расширение в традиционно аграрных субъектах, обеспечивающее основной вклад в общероссийский прирост (Саратовская и Тамбовская области). Наибольшую положительную динамику демонстрируют регионы с относительно небольшой базой, где даже умеренное расширение посевов дает существенный процентный прирост. В числе лидеров – территории Дальнего Востока и Северо-Запада, а также отдельные регионы юга России. Значительная часть регионов (Хабаровский край и Калининградская область) демонстрирует более сдержанный, но устойчивый рост, что свидетельствует не об эффекте «низкой базы», а о системном расширении посевных площадей.

По данным Росстата<sup>2</sup>, на 1 января 2024 г. России зарегистрировано 162 255 ед. К(Ф)Х и ИП с основным видом экономической деятельности «Сельское хозяйство» и «Рыбоводство», из которых К(Ф)Х – 10 772 ед., главы К(Ф)Х – 104 606 ед., ИП – 46 887 ед. В России насчитывается 40 519 тыс. ед. сельскохозяйственных организаций (67 % из которых относятся к малым), а также более 17 млн личных подсобных хозяйств и других индивидуальных хозяйств граждан и 6483 сельскохозяйственных потребительских кооператива.

Рост интереса предпринимателей к сельскохозяйственной деятельности подтверждается статистикой регистраций: по итогам 2025 г. в России открыто около 16 000 новых К(Ф)Х<sup>3</sup>. Помимо традиционного производства, аграрии осваивают новые направления: создают объекты агротуризма и способствуют комплексному развитию сельских территорий. Динамика численности К(Ф)Х и ИП в России и федеральных округах представлена в таблице 5<sup>4</sup>.

Лидирующие позиции в России по количеству К(Ф)Х и ИП занимают Южный ФО (23,9 %), Приволжский ФО (18,8 %) и Северо-Кавказский ФО (16,2 %) (рис. 1). Это обусловлено не только благоприятными климатическими условиями, но и традиционно развитой сетью сельских поселений в регионах Юга и Северного Кавказа. В Центральном ФО, в частности в Московской области, насчитывается более 800 К(Ф)Х.

В Южном ФО лидируют по численности К(Ф)Х и ИП следующие регионы: Краснодарский край – 13 081 ед., Ростовская область – 9576 ед., Волгоградская область – 4647 ед. Краснодарский край обладает значительным аграрным потенциалом благодаря высокому плодородию почв и благоприятным природно-климатическим условиям, а также развитой производственной инфраструктуре. Близость к крупнейшим морским портам снижает количество транспортных издержек при экспорте и обеспечивает прямой доступ к рынкам Ближнего Востока, Африки и Азии. Наличие развитой дорожной сети упрощает внутренние перевозки и сбыт продукции. Кубань участвует в федеральных программах комплексного развития сельских территорий. Фермерский сектор Кубани, особенно в Брюховецком районе, демонстрирует стабильный рост и вносит существенный вклад в экономику региона. Важным фактором развития малых форм хозяйствования выступает государственная поддержка (гранты и субсидии), которая позволяет фермерам обновлять материально-техническую базу, приобретать современное оборудование, а также успешно осуществлять конкуренцию на рынке. В 2025 г. в рамках государственной программы Краснодарского края «Развитие сельского хозяйства и регулирование рынков сельскохозяйственной продукции» шесть фермерских хозяйств Брюховецкого района получили государственную поддержку в размере 3 млн руб.

В 2025 г. медиагруппа «Комсомольская правда» и Россельхозбанк организовали конкурс «25 легендарных фермеров» среди К(Ф)Х по семи номинациям, включая «Фермер года» – для агропредприятий, добившихся особо значимых результатов по итогам года. В рамках данной номинации хозяйства оценивались по критериям: значимость проекта для развития сельского хозяйства, высокие производственные показатели за год, значимые результаты за весь период работы и наличие отраслевых наград<sup>5</sup>. В таблице 6 представлена характеристика К(Ф)Х, вошедших в номинации «Фермер года, 2025».

Ростовская область занимает второе место в России по численности зарегистрированных К(Ф)Х и ИП в сельском хозяйстве. По данным ведомства, в регионе действуют 1,3 тыс. сельхозорганизаций, 8,3 тыс. К(Ф)Х и ИП, 915 некоммерческих товариществ и 550 тыс. личных подсобных хозяйств.

<sup>2</sup> Малые формы хозяйствования. URL: <https://xn--j1amde.xn--p1ai/sf/> (дата обращения 28.05.2026).

<sup>3</sup> Российские фермеры увеличили объемы производства на 30 % за пять лет. URL: <https://svoefarmerstvo.ru/svoemedia/articles/rossijskie-farmery-uvelichili-ob-emy-proizvodstva-na-30-za-pjat-let> (дата обращения 28.05.2026).

<sup>4</sup> Российские фермеры увеличили объемы производства...

<sup>5</sup> Фермер года. За самый большой личный прорыв в этом году. URL: <https://legendary-farmery.kp.ru/nominaciya-fermer-goda> (дата обращения 28.05.2026).



Таблица 5. Динамика количества крестьянских (фермерских) хозяйств и индивидуальных предпринимателей в России и федеральных округах (ФО) в 2021–2024 гг., ед.

Table 5. Number of smallholderfarms and individual entrepreneurs in Russia and across federal districts (ФО) in 2021–2024, units

| Территория           | Крестьянские (фермерские) хозяйства и индивидуальные предприниматели |               |               |
|----------------------|----------------------------------------------------------------------|---------------|---------------|
|                      | 01.08.2021 г.                                                        | 01.01.2023 г. | 01.01.2024 г. |
| Россия               | 118 300                                                              | 161 009       | 162 255       |
| Центральный ФО       | 14 840                                                               | 24 231        | 25 264        |
| Северо-Западный ФО   | 3460                                                                 | 6169          | 6337          |
| Южный ФО             | 30 580                                                               | 38 735        | 38 800        |
| Северо-Кавказский ФО | 21 630                                                               | 26 276        | 26 230        |
| Приволжский ФО       | 21 300                                                               | 30 017        | 30 483        |
| Уральский ФО         | 4590                                                                 | 6326          | 6497          |
| Сибирский ФО         | 13 620                                                               | 18 669        | 18 243        |
| Дальневосточный ФО   | 8260                                                                 | 10 586        | 10 401        |

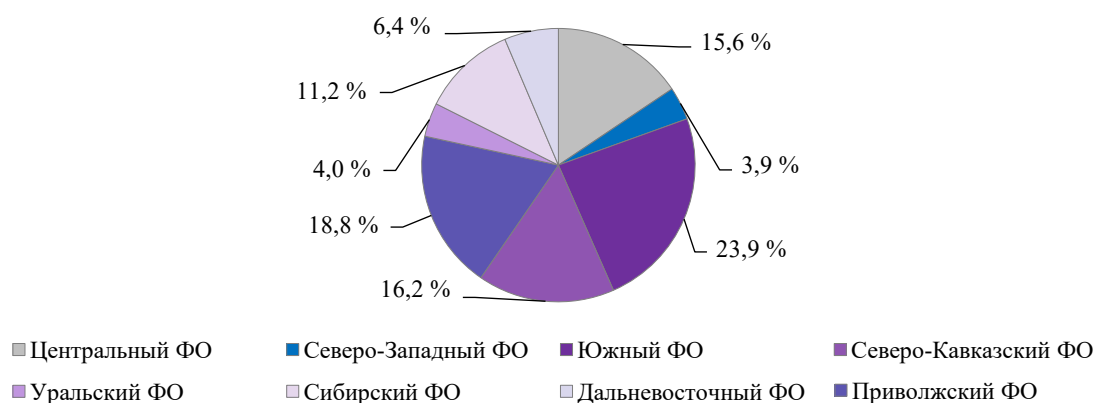


Рисунок 1. Структура крестьянских (фермерских) хозяйств и индивидуальных предпринимателей по федеральным округам России в 2024 г.

Figure 1. Smallholder farms and individual entrepreneurs across federal district in Russia, 2024

Таблица 6. Характеристика крестьянских (фермерских) хозяйств (К(Ф)Х) номинации «Фермер года, 2025 г.»

Table 6. Smallholder farms nominated for Farmer of the Year in 2025

| Название (регион)                                         | Основной вид деятельности                                                         | Выручка, тыс. руб. | Чистая прибыль, тыс. руб. | Основные средства, тыс. руб. | Рентабельность продаж, % |
|-----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|--------------------|---------------------------|------------------------------|--------------------------|
| К(Ф)Х Аникьева А. В. (Свердловская область, с. Полдневая) | Разведение молочного крупного рогатого скота, производство сырого молока          | 234 534            | 51 868                    | 261 228                      | 12,8                     |
| К(Ф)Х Устинова В. И. (Алтайский край, с. Контошино)       | Выращивание зерновых и зернобобовых культур                                       | 147 050            | 35 851                    | 271 851                      | 28,0                     |
| К(Ф)Х Зубаревой Н. В. (Красноярский край, пгт. Шушенское) | Выращивание зерновых (кроме риса), зернобобовых культур и семян масличных культур | 773 000            | 214 000                   | —                            | 39,3                     |
| К(Ф)Х «АГРОЛЮКС-2019» (Херсонская область, с. Гладковка)  | Выращивание зерновых (кроме риса), зернобобовых культур и семян масличных культур | 36 195             | 18 469                    | 1233                         | 34,4                     |
| К(Ф)Х «Березка» (Челябинская область, п. Новый Мир)       | Выращивание семян масличных культур                                               | 274 285            | 66 552                    | 380 464                      | 34,9                     |

В Волгоградской области отмечается устойчивый рост числа фермерских хозяйств. По итогам 2024 г. регион занял 6-е место среди субъектов России по количеству К(Ф)Х<sup>6</sup>. В 2024 г. фермерские хозяйства обеспечили 28,9 % общего объема сельскохозяйственной продукции региона. За последние 10 лет в рамках национального проекта «Малое и среднее предпринимательство» гранты на общую сумму около 3 млрд руб. получили порядка 900 фермеров и сельскохозяйственных кооперативов Волгоградской области.

В Северо-Кавказском ФО лидируют по численности К(Ф)Х и ИП Ставропольский край (7131 ед.), Республика Дагестан (6290 ед.) и Кабардино-Балкарская Республика (4115 ед.); в Центральном ФО – Воронежская (3702 ед.), Московская (2869 ед.) и Белгородская области (2274 ед.). В Сибирском ФО наибольшее число К(Ф)Х и ИП зафиксировано в Иркутской области (3668 ед.), Алтайском крае (3197 ед.) и Омской области (2059 ед.); В Дальневосточном ФО – Республика Саха (Якутия) – 3280 ед., Приморский край – 1608 ед., Республика Бурятия – 1258 ед.

В Приморском крае на 2027 г. запланировано открытие оптово-распределительного логистического центра с фермерским рынком для хранения, предпродажной подготовки и реализации фермерской продукции.

В Северо-Западном ФО наибольшее число К(Ф)Х и ИП зарегистрировано в Ленинградской (1250 ед.) и Калининградской областях (836 ед.); в Уральском ФО – в Челябинской (2039 ед.), Свердловской (1548 ед.) и Курганской областях (1312 ед.).

Наибольший вклад в выручку К(Ф)Х и ИП вносит Южный ФО – это обусловлено благоприятными климатическими условиями и близостью к экспортным каналам. Основной источник этой выручки – растениеводство. На этот округ приходится около 182 млрд руб., что составляет 29 % общероссийского объема. Более пятой части общероссийской выручки обеспечивают К(Ф)Х Приволжского ФО. Третье место занимает Центральный ФО, хозяйства которого опередили фермеров Сибири и Северного Кавказа. По 5 % выручки приходится на Дальний Восток и Урал. Наименьшие показатели среди федеральных округов демонстрирует Северо-Западный ФО, занявший 8-е место с выручкой 9,6 млрд руб., что составляет 2 % от общего объема.

По данным Росстата, на 1 января 2025 г. численность сельского населения России составляет 36,3 млн человек или 25 % всего населения страны<sup>7</sup> (рис. 2).

Наиболее высокая доля сельского населения среди федеральных округов отмечена в Северо-Кавказском ФО (48,0 %) и Южном ФО (36,7 %). Лидером по численности сельского населения в 2025 г. выступил Приволжский ФО – 7,8 млн человек. Согласно данным Росстата, в период 2024–2025 гг. наибольшее

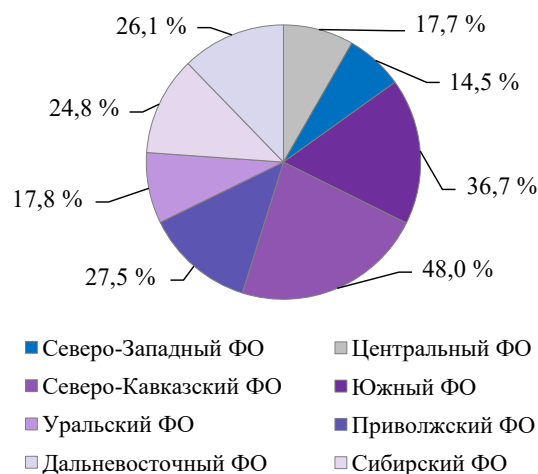


Рисунок 2. Удельный вес сельского населения в общей численности населения по федеральным округам России в 2025 г.

Figure 2. Rural population across federal district, 2025

сокращение доли сельского населения зафиксировано в Северо-Кавказском ФО (–1,1 п.п.).

Сельскохозяйственные кооперативы зарекомендовали себя как эффективный инструмент вовлечения молодежи в аграрный сектор, расширяя возможности трудоустройства и способствуя сокращению бедности. Однако ключевые факторы участия молодежи в этом секторе остаются недостаточно изученными. В исследовании М. М. Lukwago *et al.* [9] показали, что основными катализаторами участия молодежи являются размер земельного и членские взносы. К числу значимых факторов также отнесены институциональные условия, маркетинг, размер домохозяйства, площадь арендованной и обрабатываемой земли, распределение обязанностей и наличие дополнительной занятости. Авторы рекомендуют пересмотреть нормативные основы деятельности кооперативов с целью повышения привлекательности для молодых участников. Проведенное исследование подтверждает потенциал сельскохозяйственных кооперативов в улучшении экономического положения молодежи.

Результаты свидетельствуют, что наиболее остро проблемы сбыта продукции малого аграрного бизнеса проявляются в регионах аграрной специализации. В настоящее время К(Ф)Х и ИП организуют сбыт своей продукции самостоятельно и локально. В последние годы сокращается число розничных рынков и ярмарок, при этом сетевые супермаркеты отдают предпочтение крупным производителям. Развитие системы оптово-распределительных центров в АПК России направлено на устранение дефицита мощностей по хранению, переработке и распределению сельхозпродукции. Это позволит снизить издержки участников рынка и создать базу для расширения производства и повышения производительности [10].

<sup>6</sup> Территориальный орган Федеральной службы государственной статистики по Волгоградской области. URL: <https://34.rosstat.gov.ru/> (дата обращения 28.05.2026).

<sup>7</sup> Малые формы хозяйствования...

На рисунке 3 представлены каналы сбыта продукции К(Ф)Х и ИП, требующие масштабного внедрения в России. Эффективное развитие малого агробизнеса напрямую зависит от строительства в районных и областных центрах кооперативных рынков и оптово-логистических центров для сбыта производимой ими продукции [2]. В результате должна сформироваться

федеральная кооперативная торговая сеть, способная конкурировать с крупным продовольственным ритейлом. Целесообразно стимулировать контрактное сельское хозяйство, при котором крупное предприятие-интегратор (агрофирма, холдинг, перерабатывающее предприятие, крупная сельскохозяйственная организация) передает часть своего производственного



Рисунок 3. Каналы продаж сельскохозяйственной продукции крестьянскими (фермерскими) хозяйствами

Figure 3. Sales channels for agricultural products from smallholder farms

цикла – прежде всего выпуск сырья – более мелким хозяйствам, поставляя им необходимые ресурсы и принимая продукцию на переработку и реализацию. Это обеспечивает фермерам гарантированный сбыт и доступ к современным агротехнологиям. Р. Barik *et al.* [11] отмечают, что компания PepsiCo (США) привлекает посредников в качестве агентов благодаря гарантированному вознаграждению агентов и фиксированным ценам для фермеров, так же компания перераспределяет капитальные и производственные риски. Анализ цепочек создания стоимости на разных этапах производства демонстрирует, что контрактное земледелие позволяет решать проблемы ресурсного обеспечения и объемов производства мелких фермеров.

Доступ к рынкам для мелких фермеров – ключевая задача аграрной политики в развивающихся странах. Однако мелкие фермеры часто сталкиваются с барьерами при выходе к прибыльным каналам сбыта. Результаты исследования S. Chauhan *et al.* [12] показывают, что на выбор канала сбыта влияют ресурсные возможности домохозяйств и социальный капитал. Продажа риса через государственные агентства обеспечивает фермерам более высокие цены благодаря субсидиям и близости к хозяйствам; реализация через лицензированных торговцев на регулируемых рынках (АРМС), напротив, сопровождается снижением цен из-за высоких транспортных расходов. Кроме того, мелкие фермеры, продающие продукцию государственным агентствам, переработчикам или лицензированным торговцам, а не сельским посредникам, получают более высокий доход. Это объясняется небольшим рыночным излишком у фермеров, ориентированных на сельских посредников. В настоящее время в Индии насчитывается 2477 основных контролируемых рынков и 4843 субрыночные площадки, регулируемые соответствующими сельскохозяйственными рыночными комитетами. Минимальные закупочные цены (МЗЦ) устанавливаются на основе рекомендаций Комиссии по сельскохозяйственным затратам и ценам и рассчитываются с учетом себестоимости производства, спроса и предложения, ценовых тенденций на внутреннем и мировом рынках, межкультурного ценового паритета и влияния закупочных цен на потребителей.

1 марта 2025 г. в России вступил в силу закон об агроагрегаторах, направленный на формирование инфраструктуры для сбыта фермерской продукции через поддержку малых форм хозяйствования в сельском хозяйстве. Согласно закону, агроагрегаторами признаются организации, основные виды деятельности которых относятся к сфере обращения фермерской продукции и при этом соответствуют критериям, установленным Правительством РФ. Агроагрегаторы выступают важным звеном современной продовольственной системы, обеспечивая население качественными и свежими продуктами питания, что отвечает задачам национального проекта «Технологическое обеспечение продовольственной безопасности» (реализуется по решению

Президента В. В. Путина). Основные принципы работы агроагрегатора включают в себя централизованные закупки продукции от фермеров, создание инфраструктуры для обработки и хранения продукции, сборку объединенных партий для реализации через торговую сеть и организацию логистики. Фермерам в рамках платформы также доступны сопутствующие услуги: консультирование по производству и сбыту, помощь в документообороте и маркировке, аналитическая поддержка, обучение, совместное финансирование закупок сырья и материалов, страхование и др. С 2026 г. агроагрегаторам установлено возмещение части затрат на закупку продукции у фермерских хозяйств в дифференцированном размере: 10 % – при объеме закупок от 5 до 25 млн руб., 12 % – при объеме свыше 25 до 50 млн руб., 15 % – при объеме более 50 млн руб.

В настоящее время в России создано около 80 агроагрегаторов в 42 регионах. Наибольшее их число зафиксировано в Центральном ФО (21), Приволжском ФО (17) и Южном ФО (10) (рис. 4).

Анализ размещения агроагрегаторов по регионам России показывает, что основная их часть сосредоточена в Московской и Волгоградской областях, Краснодарском крае и Республике Башкортостан (рис. 5).

Волгоградская область стала первым субъектом Южного ФО, где в 2024 г. запустили агрологистический проект «Агроагрегатор». Проект позволяет торговым сетям привлекать фермеров, которые не имеют возможности работать с ретейлерами напрямую, и увеличивать долю местной продукции на полках магазинов. Агроагрегаторы не только консолидируют небольшие партии фермерской продукции, но и осуществляют ее предпродажную подготовку: калибровку, мойку, фасовку, а также обеспечивают временное хранение

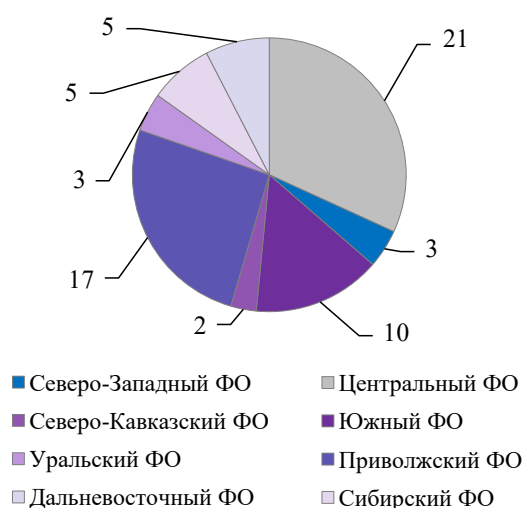


Рисунок 4. Число агроагрегаторов по федеральным округам России, данные на 27.05.2026 г., ед.

Figure 4. Agricultural aggregators across federal districts, May 27, 2026, units



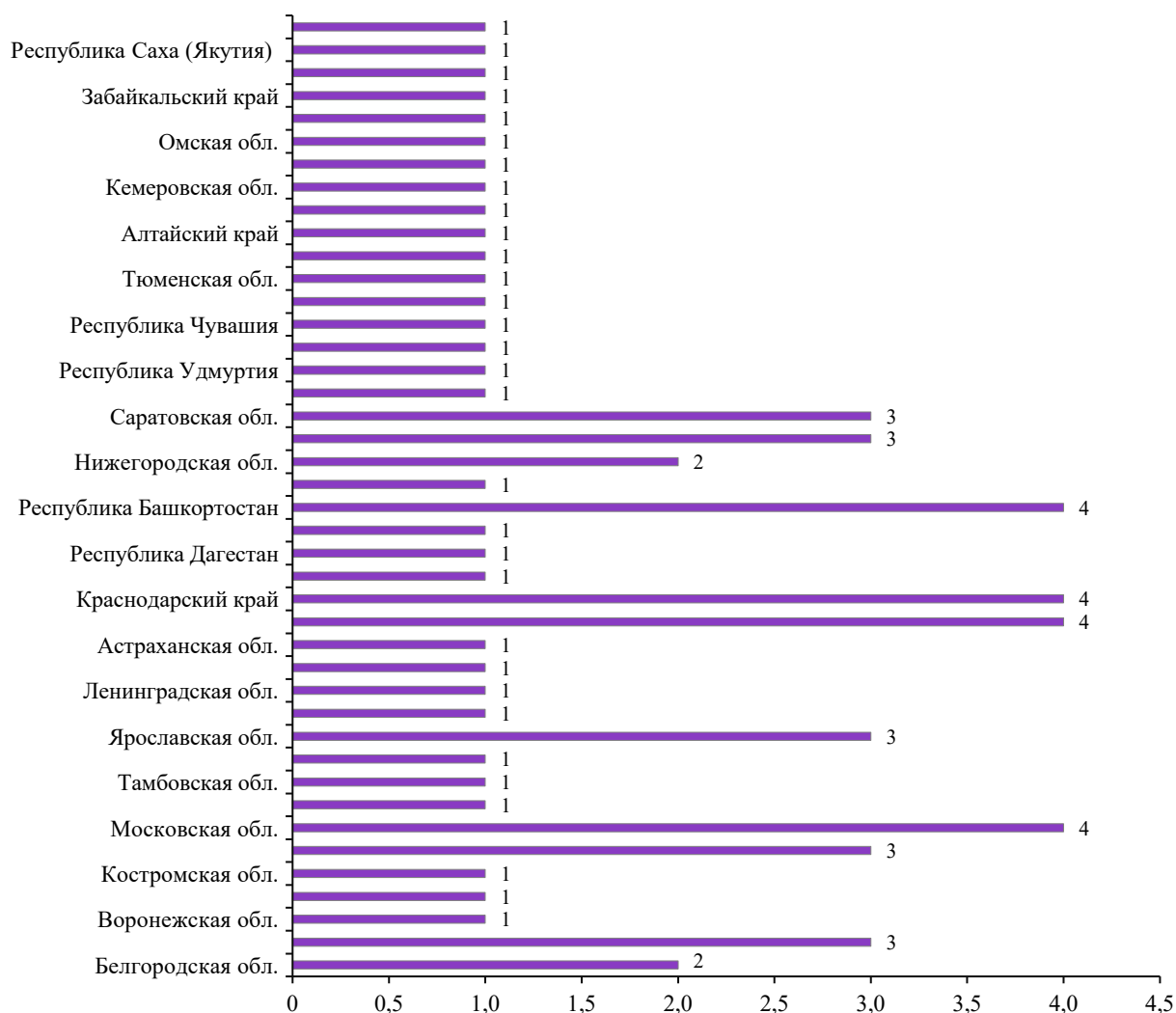


Рисунок 5. Число агроагрегаторов по регионам России в 2026 г.

Figure 5. Agricultural aggregators across regions, 2026

и транспортировку. Фермеры получают юридическое и бухгалтерское сопровождение сбыта. Торговые сети, в свою очередь, имеют гарантированные поставки сельхозпродукции, в соответствии с потребностями магазинов, и возможность гибкого ценообразования.

Сбытовой потребительский сельхозкооператив «Агроторг» в Волгоградской области заключил договор на поставку плодовоовощной продукции в распределительные центры торговых сетей X5 Group на территории Южного ФО и соопределяющих регионов. Агроагрегатор «Агроторг» объединил 9 фермеров из разных районов Волгоградской области. Компания «АгроФас» скоординировала работу 13 фермеров из Городищенского, Иловлинского, Среднеахтубинского и Калачевского районов Волгоградской области. По итогам 2025 г. через агроагрегаторы продукцию в сети X5 поставляли более 500 фермерских хозяйств России, а общий объем отгрузок превысил

90 тыс. т продукции. Характеристика успешных агроагрегаторов Волгоградской области представлена в таблице 7.

ССПК «Волгоградский урожай» выполняет функции агроагрегатора: создает инфраструктуру для хранения и предпродажной подготовки овощей (сортировка, фасовка, упаковка). За счет грантовых средств кооператив планирует приобрести модульные производственные объекты для наращивания мощностей хранения и увеличения объемов реализации к 2028 г. почти вдвое. В дальнейшем ожидается установка оборудования для автоматизированной приемки сырья непосредственно с поля.

Региональная специфика сбыта фермерской продукции в Волгоградской области – это сочетание инфраструктурных проектов, сельскохозяйственной потребительской кооперации, государственной поддержки и ориентации на развитие малых форм хозяйствования.

Таблица 7. Общая характеристика агроагрегаторов Волгоградской области в 2026 г.

Table 7. General characteristics of agricultural aggregates in the Volgograd Region, 2026

| Название                                   | Количество крестьянских (фермерских) хозяйств, ед. | Специализация                                                             | Каналы сбыта                                                                                                                       | Суточная мощность переработки, тыс. т | Объем поставок сельхоз-продукции за 2025 г., тыс. т | Площадь овоще-хранилищ, м <sup>2</sup> |
|--------------------------------------------|----------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------------------------|----------------------------------------|
| ССПК «Волгоградский урожай»                | 30                                                 | Оптовая торговля фруктами и овощами                                       | Ритейл: X5 Group, «Магнит», «Пятерочка», сельскохозяйственные розничные рынки.                                                     | –                                     | 6                                                   | 2000                                   |
| СПСК «Волгоградский агропромышленный союз» | 14                                                 | Оптовая торговля фруктами и овощами                                       | Ритейл: X5, «Магнит». Государственные закупки и тендеры. Сельскохозяйственные розничные рынки. Ярмарки. Сеть фермерских магазинов. | –                                     | –                                                   | –                                      |
| Агрегатор «АгроФас»                        | 13                                                 | Оптовая торговля фруктами и овощами                                       | Ритейл: X5 Group, «Перекресток», «Пятерочка».                                                                                      | до 0,60                               | 7                                                   | 3000                                   |
| СПСК «Агроторг»                            | 9                                                  | Оптовая торговля овощами борщевого набора, арбузами, зерновыми культурами | Ритейл: X5 Group, «Пятерочка», «Перекресток»                                                                                       | более 100                             | более 2                                             | более 6000                             |

Для региона характерны высокая доля малых форм хозяйствования и активная государственная поддержка. Специфика Волгоградской области также обусловлена ее аграрной специализацией: регион входит в число лидеров по производству овощей (в т. ч. так называемого «борщевого набора»), причем значительную долю этой продукции обеспечивают именно малые формы хозяйствования. Это формирует устойчивый спрос на механизмы агрегации, помогающие мелким производителям преодолевать ограничения небольших объемов. Продвижению фермерской продукции в торговые сети уделяется большое внимание и на федеральном уровне. Волгоградская область вошла в число пилотных регионов по выходу фермеров на маркетплейсы (например OZON fresh). Выводы, полученные по Волгоградской области, не могут быть экстраполированы на все регионы России без учета локальной специфики.

На 1 января 2026 г. в России насчитывалось 154 сельскохозяйственных розничных рынка и 5 сельскохозяйственных кооперативных розничных рынков. Наибольшее число сельскохозяйственных рынков сосредоточено в Центральном (44) и Южном ФО (41). На 1 января 2025 г. количество специализированных ярмарок продовольственных товаров составляло 9752, при этом доля торговых мест для К(Ф)Х на ярмарках достигла 6,9 % от общероссийского показателя.

В 2026 г. стартовал совместный проект Ассоциации «Народный фермер» и «Народный фермер Анапы», согласно которому в Анапе функционирует единственная в регионе ярмарка фермерской продукции, на которой фермеры самостоятельно распределяют торговые места и регулируют цены без посредников. Ежедневно сотрудники проводят мониторинг цен в торговых сетях и на розничных рынках вблизи ярмарки – это особенно важно для ранних ягод, фруктов и овощей, цены на которые наиболее подвержены колебаниям. Ярмарка работает на трех площадках, каждая из которых открыта дважды в неделю по утвержденному графику в соответствии с постановлением городской администрации. На каждой площадке оборудовано до 40 торговых мест, формат – мобильный (палатки и автолавки – тонары). В ассортименте – сезонный виноград, ягоды, овощи, фрукты, свежее мясо, молочная и мясная продукция, разливное молоко, халва, пастила. В ярмарке участвуют хозяйства Анапского, Крымского, Славянского, Темрюкского и Брюховецкого районов.

Т. Н. Ноанг *et al.* [13] проанализировали восприятие потребителями органической сельскохозяйственной продукции, реализуемой через прямые трансляции – новый формат цифровой розничной торговли на развивающихся рынках. Авторы отмечают перспективность этого инструмента для укрепления связей с локальным

продовольственным рынком и стимулирования ответственного потребления. Фермы активно вовлекают семьи: проводят школьные экскурсии и познавательные прогулки. В Иркутском районе функционирует ягодный питомник по модели «ферма самообслуживания».

Цифровизация и массовый переход в онлайн сделали электронную коммерцию (e-commerce) одним из ключевых драйверов изменений в мировой экономике. В сентябре 2025 г. компания X5 запустила онлайн-платформу «Большая полка X5», которая разработана совместно с АО «Корпорация МСП». Проект объединяет инициативы компании для малого и среднего бизнеса (включая агроагрегаторы) и позволяет производителям быстро начать сотрудничество с X5 и расширить каналы сбыта. Цифровая платформа Food Miles, управляющая доставкой от региональных производителей в крупные розничные сети, выступает агрегатором в рамках сотрудничества с «Магнитом» и координирует поставки фермерской продукции в розничные магазины. На первом этапе проекта через Food Miles осуществлены поставки в 13 гипермаркетов «Магнит» в Санкт-Петербурге, Ленинградской области и Карелии.

V. J. Sivakumar *et al.* [14] отразили рекомендации по внедрению сельскохозяйственных электронных торговых платформ среди фермеров через интеграцию мотивированной потребительской инновационности и технологической самоэффективности.

M. Saini *et al.* [15] изучили факторы выбора каналов сбыта фермерами-овощеводами и садоводами Индии. Результаты показывают, что супермаркеты более предпочтительны благодаря меньшим маркетинговым затратам, более высоким ценам, регулярным платежам и эффективным взаимоотношениям между продавцом и покупателем. В то же время фермеры старшего возраста, с более низким уровнем образования и большим опытом работы, отдают предпочтение традиционным каналам.

M. A. Ben-Othmen *et al.* [16] рассмотрели потенциал технологий вертикального земледелия в городских магазинах розничной торговли продуктами питания как решение растущего спроса на свежие продукты местного производства. Модель «продавай там, где ты производишь» позволяет сократить транспортные расходы, повысить прослеживаемость продукции и снизить выбросы углекислого газа. Учитывая потенциал вертикального земледелия в наращивании городского производства свежих продуктов, сокращении логистических издержек и создании устойчивых цепочек поставок, необходимо взвешенно оценить его преимущества и риски для успешной интеграции в городскую продовольственную розницу.

F. Sgroi *et al.* [17] проанализировали роль продовольственных хабов (ПХ) в деятельности фермерских хозяйств. ПХ открывают новые возможности для повышения конкурентоспособности и устойчивости небольших хозяйств, которые не могут конкурировать

с крупными дистрибьюторами. ПХ способствуют формированию «стратегической сети», объединяющей всех участников цепочки поставок – от производителей до потребителей – и служат источником создания «общей ценности». Кроме того, ПХ оказывают положительное экономическое, социальное и экологическое влияние и могут стать опорой для семейных ферм и территорий, страдающих от оттока населения.

D. R. Dave *et al.* [18] отметили, что фермерские производственные организации (ФПО) играют ключевую роль в переговорах от имени фермеров-членов, обеспечивая экономию за счет масштаба и гибкость ценообразования. В Индии действуют электронные площадки eNAM и NCDFI eMarket, которые облегчают взаимодействие между ФПО и другими участниками рынка с целью повышения эффективности. На основании проведенного исследования предложена инновационная модель электронного аукциона для цифровых рынков, которая учитывает интересы ФПО и позволяет реализовывать продукцию непосредственно на фермах.

Некоторые фермеры расширяют каналы сбыта продукции за счет агротуризма, который привлекает семьи с детьми, интересующиеся сельской жизнью и сельскохозяйственным трудом. Посетители фермы знакомятся с ее деятельностью, участвуют в полевых работах, совершают пешие, велосипедные или конные прогулки. Агротуризм становится экономически выгодным для фермера прежде всего в тех случаях, когда хозяйство расположено вблизи природных достопримечательностей, национальных парков, других зон активного отдыха, а также в густонаселенных районах и городских пригородах.

## Выводы

Малые формы хозяйствования служат основой для развития отечественной сельскохозяйственной потребительской кооперации [19]. К числу современных тенденций в развитии крестьянских (фермерских) хозяйств (К(Ф)Х) можно отнести: переход к органическому земледелию, развитие агротуризма, организацию мини-цехов по переработке сельхозпродукции, создание собственных брендов и онлайн-продажи через маркетплейсы (Свое Фермерство, Wildberries, Ozon, Яндекс Маркет и др.).

Рекомендации по развитию К(Ф)Х [20]:  
– расширить доступ к кредитам: финансовым институтам и правительству следует сотрудничать для предоставления доступных кредитов К(Ф)Х, что позволит им инвестировать в технологии и инфраструктуру. Основной инструмент – программа льготного кредитования АПК, курируемая Минсельхозом. Фермеры могут получить заем на инвестиционные цели (строительство, модернизация) или на пополнение оборотных средств;  
– развить кооперацию. Объединение в сельскохозяйственные потребительские кооперативы (сбытовые, перерабатывающие) предоставляет К(Ф)Х доступ

к общим ресурсам: технологиям хранения и переработки, каналам сбыта, льготным кредитам через кооперативные фонды;

- цифровизовать хозяйства и внедрить цифровые технологии. Интеграция элементов точного земледелия (карты полей, датчики, дроны) помогает сократить расходы на удобрения и средства защиты растений на 10–25 % и повысить управляемость хозяйством. Создание единой цифровой платформы (например информационной системы цифровых сервисов АПК), которая упростит для фермеров доступ к мерам господдержки: через нее можно будет узнавать о доступных программах, подавать заявки и собирать отчетность;
- укрепить систему управления: программы подготовки руководителей должны быть направлены на повышение прозрачности и подотчетности в кооперативах;
- инвестировать в кадры и знания. Организовывать обучение для членов хозяйства: современные методы ведения хозяйства, работа с цифровыми инструментами, основы предпринимательства;
- содействовать внедрению технологий: службы распространения сельскохозяйственных знаний должны поощрять внедрение современных сельскохозяйственных технологий для повышения производительности и конкурентоспособности;
- поддерживать устойчивое землепользование: К(Ф)Х следует внедрять методы устойчивого землепользова-

ния и управления ресурсами для повышения устойчивости к изменению климата.

Развитие малых форм хозяйствования остается важным элементом обеспечения продовольственной безопасности России, а фермеры и индивидуальные предприниматели в сельском хозяйстве вносят существенный вклад в сырьевое и продовольственное импортозамещение [21]. В перспективе фермеры будут активнее использовать инновационные методы реализации продукции, а агрегаторы становиться важным инструментом для их продвижения на рынок.

#### **Критерии авторства**

Все авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут ответственность за плагиат.

#### **Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### **Contribution**

The authors were equally involved in the research and are equally responsible for any potential plagiarism.

#### **Conflict of interest**

The authors state that there is no conflict of interest.

#### **Список литературы / References**

1. Чупина И. П., Зарубина Е. В. А. В. Чаянов о развитии фермерства в России. *Сельское хозяйство*. 2021. № 2. С. 14–18. [Chupina IP, Zarubina EV. A. V. Chayanov on the development of farming in Russia. *Agriculture*. 2021;(2):14–18. (In Russ.)] <https://doi.org/10.7256/2453-8809.2021.2.36188>
2. Петриков А. В. Семейные фермерские хозяйства в экономике и жизни общества выполняют важнейшие экономические, социальные, демографические функции. *Аграрная наука*. 2023. № 7. С. 18–19. [Petrikov AV. Family farms in the economy and in the life of society perform the most important economic, social, demographic functions. *Agrarian Science*. 2023;(7):18–19. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/MULUGG>
3. Abraham M, Pingali PL. Transforming smallholder agriculture to achieve the SDGs. In: Gomez-y-Paloma S, Riesgo L, Louhichi K, editors. *The role of smallholder farms in food and nutrition security*. Singapore: Springer; 2020. pp. 173–209. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-42148-9\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-030-42148-9_9)
4. Сурай Н. М., Михалев А. П., Столярова А. Н., Чернухина Г. Н. Рынок сыра и сырных продуктов на примере регионов-лидеров Центрального федерального округа России. *Сыроделие и маслоделие*. 2024. № 2. С. 14–23. [Suray NM, Mikhalev AP, Stolyarova AN, Chernukhina GN. The market for cheese and cheese products: a case study of leading regions in the Central Federal District of Russia. *Cheese- and Buttermaking*. 2024;(2):14–23. (In Russ.)] <https://doi.org/10.21603/2073-4018-2024-2-4>
5. Никишин А. Ф., Карашук О. С., Майорова Е. А., Большаков А. И. Анализ социальных функций торговли продуктами молочного производства. *Молочная промышленность*. 2024. № 3. С. 95–104. [Nikishin AF, Karashchuk OS, Mayorova EA, Boldiasov AI. Social functions of dairy trade. *Dairy Industry*. 2024;(3):95–104. (In Russ.)] <https://www.doi.org/10.21603/1019-8946-2024-3-7>
6. Гриценко Г. М. Комплексный подход к развитию инфраструктуры сбыта продукции аграрного малого и микробизнеса. *Техника и технология пищевых производств*. 2024. Т. 54. № 3. С. 610–620. [Gritsenko GM. Agricultural marketing in small and micro businesses: An integrated approach to infrastructural development. *Food Processing: Techniques and Technology*. 2024;54(3):610–620. (In Russ.)] <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-3-2531>
7. Das H, Singh NB. Efficiency of marketing channels and factors influencing marketing channel choice of horticultural farmers: Evidence from Assam, India. *Journal of International Food & Agribusiness Marketing*. 2025;38(1):75–101. <https://doi.org/10.1080/08974438.2025.2486243>



8. Сельское хозяйство в России. 2025: Статистический сборник. М.: Федеральная служба государственной статистики (Росстат), 2025. 81 с. [Agriculture in Russia in 2025: Collection of statistics. Moscow: Federal State Statistics Service (Rosstat). 2025. 81 p. (In Russ.)]
9. Lukwago MM, Akongo P, Mugonola B. Determinants of youths' participation in agricultural cooperatives: Evidence from Northern Uganda. *Journal of International Food & Agribusiness Marketing*. 2025;37(2):328–347. <https://doi.org/10.1080/08974438.2024.2323559>
10. Полунина Н. Ю. К вопросу развития сети оптово-распределительных центров в АПК России. Научный результат. Экономические исследования. 2025. Т. 11. № 2. С. 74–85. [Polunina NY. On the development of the network of wholesale distribution centers in the agro-industrial complex of Russia. *Research Result. Economic Research*. 2025;11(2):74–85. (In Russ.)] <https://doi.org/10.18413/2409-1634-2025-11-2-0-6>
11. Barik P, Bedamatta R, Vikraman S. Smallholders in contract farming value chain: Challenges and opportunities, empirical evidence from West Bengal, India. *Journal of International Food & Agribusiness Marketing*. 2025;37(4):604–636. <https://doi.org/10.1080/08974438.2024.2398741>
12. Chauhan S, Varma P, Singh S. Assessment of marketing channel choice and its impacts: The case of paddy smallholders in India. *Journal of International Food & Agribusiness Marketing*. 2025;37(1):197–219. <https://doi.org/10.1080/08974438.2023.2291812>
13. Hoang TH, Le PU, Pham QLND, Nguyen ND, Le THA. Trust in farmers and food safety concerns in short food supply chains: Understanding purchase intention in live-streamed organic agri-product sales. *Journal of International Food & Agribusiness Marketing*. 2025;38(3):305–334. <https://doi.org/10.1080/08974438.2025.2577450>
14. Sivakumar VJ, Ismail NM. The role of innovativeness and self-efficacy in shaping farmers' adoption of e-agricultural markets. *Journal of International Food & Agribusiness Marketing*. 2026. <https://doi.org/10.1080/08974438.2026.2623620>
15. Saini M, Ubba S, Bhatia S. Determinants of supermarket participation among fruit and vegetable farmers: Evidence from India using a transaction cost perspective. *Journal of International Food & Agribusiness Marketing*. 2026. <https://doi.org/10.1080/08974438.2026.2652986>
16. Ben-Othmen MA, Julianne C, Shaikh F. Transcending food-miles: Unpacking the drivers of in-store vertical farming adoption among food retailers in France. *Journal of International Food & Agribusiness Marketing*. 2025;37(4):687–711. <https://doi.org/10.1080/08974438.2024.2409109>
17. Sgroi F, Modica F, Berti G, Fusté-Forné F. Food hubs and the role of small farmers in sustainable agriculture. *Journal of International Food & Agribusiness Marketing*. 2025;37(3):452–466. <https://doi.org/10.1080/08974438.2024.2356599>
18. Dave DR, Sajja S. The enhancement of market efficiency and inclusion of FPOs: A novel e-auction model for agricultural marketing in India. *Journal of International Food & Agribusiness Marketing*. 2024;36(5):935–955. <https://doi.org/10.1080/08974438.2023.2233965>
19. Сурай Н. М., Миргородская М. Г., Кураев А. Н., Бурланков П. С., Мельникова Ю. В. Региональный опыт поддержки развития сельскохозяйственной потребительской кооперации. Техника и технология пищевых производств. 2022. Т. 52. № 1. С. 13–31. [Suray NM, Mirgorodskaya MG, Kuraev AN, Burlankov PS, Melnikova YuV. Regional experience in supporting the development of agricultural consumer cooperation. *Food Processing: Techniques and Technology*. 2022;52(1):13–31. (In Russ.)] <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2022-1-13-31>
20. Agegnehu MZ. Determinants of the performance of farmers' cooperatives in Ethiopia. *International Journal of Economic Behavior and Organization*. 2024;12(4):183–186. <https://doi.org/10.11648/j.ijebo.20241204.11>
21. Муравьева М. В., Воротников И. Л., Ситалиев А. Ш. Проблемы и перспективы развития крестьянских (фермерских) хозяйств и сельских индивидуальных предпринимателей. Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2023. Т. 16. № 1. С. 243–257. [Muravyova MV, Vorotnikov IL, Sitaliev AS. Problems and prospects for the development of peasant (farm) households and rural individual entrepreneurs. *Bulletin of the Voronezh State Agrarian University*. 2023;16(1):243–257. (In Russ.)] [https://doi.org/10.53914/issn2071-2243\\_2023\\_1\\_243](https://doi.org/10.53914/issn2071-2243_2023_1_243)

#### Дополнительная информация об авторах / Additional information about the authors

Сурай Наталья Михайловна / Natalya M. Suray ORCID 0000-0001-6219-4363; eLIBRARY SPIN 3562-5290  
Панасенко Светлана Викторовна / Svetlana V. Panasenko ORCID 0000-0002-7884-6124; eLIBRARY SPIN 5025-9076  
Исаева Екатерина Анатольевна / Ekaterina A. Isaeva ORCID 0000-0001-6060-8649; eLIBRARY SPIN 4686-9400  
Соколова Елена Юрьевна / Elena Yu. Sokolova ORCID 0000-0003-4240-0080; eLIBRARY SPIN 4738-6014

<https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-3-2655>  
<https://elibrary.ru/CJGWZH>

Оригинальная статья  
<https://fptt.ru>

## Режимы прессования кедрового ореха, обеспечивающие качество и биологическую ценность масла



В. А. Потураев<sup>ID</sup>, Е. С. Миллер<sup>ID</sup>, Т. А. Ларичев<sup>ID</sup>,  
О. Г. Альтшулер<sup>ID</sup>, И. С. Миленьева<sup>\*ID</sup>

Кемеровский государственный университет<sup>ROR</sup>, Кемерово, Россия

Поступила в редакцию: 07.05.2026

Принята после рецензирования: 17.07.2026

Принята к публикации: 01.09.2026

\*e-mail: [irazumnikova@mail.ru](mailto:irazumnikova@mail.ru)

© В. А. Потураев, Е. С. Миллер, Т. А. Ларичев,

О. Г. Альтшулер, И. С. Миленьева, 2026



### Аннотация.

Семена сосны сибирской кедровой (*Pinus sibirica*) являются перспективным растительным сырьем благодаря высокому содержанию полиненасыщенных жирных кислот, токоферолов, фитостеролов и минеральных веществ. Масло из кедровых орехов обладает антиоксидантными, противовоспалительными и кардиопротекторными свойствами, что определяет его ценность как компонента функционального питания. Однако технологические режимы его получения часто выбираются эмпирически, без системного учета влияния на биологически активные компоненты. Цель исследования – обосновать рациональные технологические параметры холодного и горячего прессования кедрового масла и оценить их влияние на ключевые показатели качества и биологическую ценность получаемого продукта.

Объект исследования – очищенное ядро кедрового ореха урожая 2024 г. (ООО «Кедр Экспорт», Кемерово, Россия), соответствующее ГОСТ 31852–2012. В рамках эксперимента изучали влияние температуры (10–35 °С для холодного прессования, 60–85 °С для горячего), давления (20–200 кг/см<sup>2</sup>) и продолжительности (5–40 мин) на выход липидов, содержание витамина Е, фосфора, калия и магния, а также на стандартные показатели качества (влажность, кислотное, перекисное и йодное числа). Для анализа использовали гравиметрический метод, высокоэффективную жидкостную хроматографию и атомно-эмиссионную спектроскопию с индуктивно связанной плазмой. Все измерения выполняли в трехкратной повторности, статистическую обработку проводили по критерию Стьюдента ( $p \leq 0,05$ ).

Установлены рациональные режимы: для холодного прессования – 20 °С, 160 кг/см<sup>2</sup>, 20 мин; для горячего – 75 °С, 140 кг/см<sup>2</sup>, 20 мин. Масло холодного прессования характеризовалось более высоким содержанием витамина Е, фосфора, калия и магния, меньшей влажностью и более низкими значениями перекисного и кислотного чисел, что свидетельствует о лучшей сохранности биологически активных компонентов. Горячее прессование обеспечило существенно больший выход липидов при незначительном снижении указанных показателей. Оба образца превосходили коммерческий аналог по содержанию ключевых нутриентов.

Разработанные режимы обеспечивают получение кедрового масла повышенного качества. Холодное прессование предпочтительно для максимального сохранения биологически активных веществ, горячее – для увеличения выхода продукта.

**Ключевые слова.** *Pinus sibirica*, холодное прессование, горячее прессование, оптимизация параметров, выход масла, токоферолы, фосфор, биологически активные вещества, качество растительного масла

**Для цитирования:** Потураев В. А., Миллер Е. С., Ларичев Т. А., Альтшулер О. Г., Миленьева И. С. Режимы прессования кедрового ореха, обеспечивающие качество и биологическую ценность масла. Техника и технология пищевых производств. 2026. Т. 56. № 3. С. 543–555. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-3-2655>

## Technological Modes for Pine Nut Oil: Preserving Quality and Biological Value



Vyacheslav A. Poturaev<sup>ID</sup>, Ekaterina S. Miller<sup>ID</sup>,  
Timothy A. Larichev<sup>ID</sup>, Olga G. Altshuler<sup>ID</sup>, Irina S. Milentyeva\*<sup>ID</sup>

Kemerovo State University<sup>ROR</sup>, Kemerovo, Russia

Received: 07.05.2026  
Revised: 17.07.2026  
Accepted: 01.09.2026

\*e-mail: [irazumnikova@mail.ru](mailto:irazumnikova@mail.ru)  
© V.A. Poturaev, E.S. Miller, T.A. Larichev, O.G. Altshuler,  
I.S. Milentyeva, 2026



### Abstract.

Siberian cedar pine (*Pinus sibirica*) seeds are rich in polyunsaturated fatty acids, tocopherols, phytosterols, and minerals. Pine nut oil possesses antioxidant, anti-inflammatory, and cardioprotective properties, making it a valuable functional food component. However, production methods are often chosen empirically without considering their impact on biologically active components. This study substantiates rational process parameters for the cold and hot pressing of Siberian pine nut oil and evaluates their impact on key quality indicators and the biological value of the finished product.

The research examined Siberian pine nut kernels harvested in 2024 (Kedr Export LLC, Kemerovo, Russia) complying with State Standard GOST 31852–2012. The experiment examined the effects of temperature (10–35°C for cold pressing, 60–85°C for hot pressing), pressure (20–200 kg/cm<sup>2</sup>), and processing time (5–40 min) on the yield of lipids, vitamin E, phosphorus, potassium, and magnesium, as well as standard quality parameters (moisture, acidity, peroxide, and iodine values). The analytical methods included gravimetric analysis, high-performance liquid chromatography, and inductively coupled plasma atomic emission spectrometry. All measurements were performed in triplicate and subjected to statistical analysis using Student's *t*-test ( $p \leq 0.05$ ). The optimal conditions were established as follows: cold pressing – 20°C, 160 kg/cm<sup>2</sup>, 20 min; hot pressing – 75°C, 140 kg/cm<sup>2</sup>, 20 min. Cold-pressed oil demonstrated higher levels of vitamin E, phosphorus, potassium, and magnesium, alongside a lower moisture content and lower peroxide and acidity values, indicating better preservation of bioactive components. Hot pressing provided a significantly higher lipid yield with a slight decrease in these parameters. Both samples exceeded their commercial counterparts in key nutrient content.

The developed methods ensured the production of high-quality cedar oil. Cold pressing demonstrated more effective preservation of bioactive substances, while hot pressing increased the yield.

**Keywords.** *Pinus sibirica*, cold pressing, hot pressing, parameter optimization, oil yield, tocopherols, phosphorus, biologically active substances, quality of vegetable oil

**For citation:** Poturaev VA, Miller ES, Larichev TA, Altshuler OG, Milentyeva IS. Technological Modes for Pine Nut Oil: Preserving Quality and Biological Value. Food Processing: Techniques and Technology. 2026;56(3):543–555. (In Russ.) <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-3-2655>

### Введение

В настоящее время потребители уделяют все больше внимания поддержанию здоровья и повышению качества жизни, что в условиях современного образа жизни является важнейшим аспектом питания. Производство функциональных продуктов питания и их компонентов представляет собой одно из актуальных направлений развития пищевой промышленности [1–3]. Основной интерес сосредоточен на изучении как традиционных, так и нетрадиционных видов сырья с целью получения не только питательных, но и биологически активных веществ [3–7]. В числе перспективных видов нетрадиционного пищевого сырья – семена сосны кедровой сибирской – кедровые орехи [8, 9].

Продукты переработки кедровых орехов могут рассматриваться как перспективный ингредиент для функционального питания благодаря высокому содержанию полиненасыщенных жирных кислот, токоферолов, фитостеролов, минеральных компонентов и других биологически активных веществ. Регулярное включение кедровых орехов и продуктов их переработки в рацион питания обеспечивает повышение пищевой ценности рациона, поставляя в организм незаменимые нутриенты и антиоксиданты. Исследования показывают, что биологически активные компоненты кедрового ореха, в частности пиноленовая кислота, обладают противовоспалительными, противоревматическими и анорексигенными свойствами [10]. Кроме того, установлено, что масло кедрового ореха проявляет

антибактериальную, противогрибковую, противовирусную, антисептическую, отхаркивающую, желчегонную, мочегонную, антигипертензивную и антихолестериновую активность [11]. Данное масло отличается мощным антиоксидантным эффектом, защищает организм от действия свободных радикалов за счет содержащихся в нем токоферолов, фитостеролов, полиненасыщенных жирных кислот, которые способствуют снижению интенсивности свободнорадикального окисления липидов [12]. Продукты переработки кедрового сырья характеризуются высокой пищевой ценностью и содержанием комплекса биологически активных веществ, включая полиненасыщенные жирные кислоты, витамины, минеральные компоненты и полифенольные соединения, что обуславливает перспективность их использования при создании функциональных пищевых продуктов [13]. Биологически активные вещества, входящие в состав кедрового масла, прежде всего пиноленовая кислота, проявляют противовоспалительные свойства, способствуют снижению окислительного стресса и оказывают благоприятное влияние на сердечно-сосудистую систему благодаря улучшению липидного обмена и уменьшению выраженности воспалительного процесса [14]. Перспективность данного сырья обусловлена высокой продуктивностью вида, возобновляемостью биоресурсов, а также высокой пищевой ценностью семян.

Ядра кедрового ореха содержат от 60 до 70 % липидов, от 13 до 20 % белков, от 13 до 18 % углеводов. В состав липидов входят насыщенные (до 5 %), мононенасыщенные (до 19 %) и полиненасыщенные (до 34 %) жирные кислоты. Белок ядер кедровых орехов содержит 17 из 23 важнейших аминокислот, включая девять незаменимых. В химическом составе кедровых орехов присутствуют жиры (кедровое масло), азотистые вещества (представленные преимущественно белками), углеводы (крахмал и сахара), а также органические кислоты и дубильные вещества [15, 16].

Наибольшая биологическая активность кедрового масла обусловлена высоким содержанием тиамина (витамин B<sub>1</sub>) и токоферола (витамин E). По этим показателям кедровое масло значительно превосходит большинство известных пищевых продуктов, содержащих указанные витамины.

Таким образом, ядра кедрового ореха и кедровое масло представляют собой ценнейшие высококачественные пищевые продукты, включающие помимо глицеридов незаменимых жирных кислот значительное количество биологически активных веществ. Добавление этого продукта в рацион человека необходимо для поддержания полноценной жизнедеятельности организма.

Производство кедрового масла характеризуется несколькими последовательными стадиями: подготовкой сырья, получением ядер кедровых орехов и извлечением масла. На этапе подготовки сырья осуществляется сбор шишек, извлечение орехов, очистка от при-

месей, сортировка и сушка. Качество подготовки орехов перед переработкой оказывает существенное влияние на сохранность липидного комплекса и качественные характеристики получаемого масла [12, 17].

После подготовки сырья проводится обрушивание ореха с отделением ядра. Качество полученного ядра, его влажность и степень механического повреждения выступают важными факторами, определяющими эффективность последующего извлечения масла [18]. Для получения кедрового масла применяют механическое прессование и экстракционные методы. Наиболее распространенным способом является холодное прессование, которое позволяет сохранить значительную часть токоферолов и фитостеролов, а также обеспечивает минимизацию деградации полиненасыщенных жирных кислот [12].

В. Н. Невзоров и др. [19] применили технологию двухэтапного холодного прессования, при которой выход масла составил 27,87 %. Основной задачей авторы ставили подбор пресса для извлечения масла, т. к. вид прессующего устройства влияет на выход масла. Следует отметить, что холодное прессование хоть и обеспечивает сохранение всех биологически активных веществ масла, но не позволяет в полной мере выделить все липиды из ядра кедрового ореха. Кроме того, масла, полученные методом холодного прессования, могут характеризоваться низкой эффективностью и иметь непостоянное качество, что делает их срок годности более коротким [17]. В отличие от этого, горячее прессование увеличивает выход масла за счет нагревания предварительно обработанного сырья. С физиолого-диетологической точки зрения, масла холодного прессования предпочтительнее рафинированных. Однако выход масла обычно составляет менее 70 %, что приводит к высокому остаточному содержанию масла в жмыхе, ограничивая их коммерческую целесообразность. При этом холодное прессование устраняет необходимость в энергоемкой обработке растворителями и значительно снижает воздействие на окружающую среду. Поэтому оно считается предпочтительным методом экстракции кедрового масла в регионах с ограниченными ресурсами [12].

Наряду с прессованием используются экстракция органическими растворителями, субкритическая экстракция, а также водно-ферментативные и ультразвуковые методы извлечения масла, обеспечивающие более высокий выход липидов [20]. В качестве растворителей применяют экстракционные бензины и гексан, которые отличаются токсичностью и требуют тщательного удаления из масла и шрота путем отгонки. А. Г. Хантургаев и др. [21] в роли альтернативы предложили экстракцию менее токсичным и более безопасным пищевым этиловым спиртом под воздействием электромагнитного поля сверхвысокой частоты. При этом выход кедрового масла составил 63–64 %. Однако при масштабировании данной технологии необходимо учитывать, что потребуются большие



объемы этилового спирта, что приведет к повышению себестоимости готовой продукции, а также потребует затрат на очистку масла от растворителя. Экстракция диэтиловым эфиром в аппарате Сокслета обеспечивает выход кедрового масла на уровне 60 %, но такой метод затратнее и предполагает использование токсичного растворителя [22].

Для более эффективной экстракции масла применяют электромагнитное поле СВЧ, представляющее собой излучение низкой энергии, соответствующее вращательной энергии молекул и недостаточной для разрыва химической связи. Излучение взаимодействует с компонентами системы и экстрагентом по механизмам дипольного вращения и ионной проводимости. В результате этого взаимодействия в системе протекают кооперативные процессы: быстрый объемный разогрев реакционной смеси, разрушение сферосом в клетках ядра и высвобождение липидов вследствие возникающих градиента температуры и избыточного давления, а также их растворение в экстрагенте [23]. Установлено, что повышение температуры технологического процесса способствует увеличению выхода масла, однако может сопровождаться изменением содержания отдельных термолабильных компонентов и снижением окислительной стабильности продукта [24].

Тем не менее технологические режимы получения кедрового масла, такие как температура, давление и продолжительность, зачастую выбираются эмпирически, без учета их совокупного влияния на выход и качество продукта. Существующие технологические инструкции не содержат строго обоснованных параметров, что приводит либо к недополучению масла, либо к разрушению термолабильных компонентов – витамина Е и каротиноидов – вследствие избыточного нагрева.

Обоснование выбора режимов прессования базируется на необходимости разрешения основного противоречия, характерного для производства растительных масел: между стремлением к максимальному извлечению липидов и требованием сохранения нативной биологической активности продукта [25]. С одной стороны, увеличение температуры и давления при прессовании способствует снижению вязкости масла, деструкции клеточных стенок и более полному высвобождению липидов из маслосодержащего материала, что закономерно повышает выход готового продукта. С другой стороны, интенсификация этих параметров инициирует нежелательные процессы, приводящие к снижению пищевой ценности масла. В частности, повышение температуры сопровождается ускорением окислительной деградации полиненасыщенных жирных кислот и значительными потерями термолабильных биологически активных соединений, среди которых ключевое место занимают токоферолы (витамин Е) и каротиноиды [12, 26].

Выбор холодного прессования в качестве одного из методов исследования обусловлен тем, что он при-

знан щадящей технологией, обеспечивающей более высокую сохранность компонентов липидного комплекса. Отсутствие интенсивного теплового воздействия способствует снижению степени окислительной деградации полиненасыщенных жирных кислот, в т. ч. редко встречающейся пиноленовой кислоты, а также обеспечивает высокую сохранность токоферолов и фитостеролов, придающих маслу высокую антиоксидантную активность [27]. Однако, как отмечалось ранее, данный метод характеризуется невысоким выходом масла, что ограничивает его промышленную эффективность [12]. Следовательно, экспериментальный подбор рациональных параметров давления, продолжительности процесса и допустимого температурного порога в рамках холодного прессования является критически важной задачей для максимизации выхода продукта без ущерба для его качества.

В свою очередь, исследование режима горячего прессования обусловлено необходимостью изучения способов повышения экономической эффективности производства. Предварительная влаготепловая обработка и последующее прессование при повышенных температурах позволяют существенно увеличить степень извлечения липидов из ядра и приблизить выход масла к коммерчески целесообразным показателям. Однако, как свидетельствуют литературные данные, применение данного метода сопряжено с риском термической деструкции термолабильных компонентов, таких как фенолы и токоферолы [28]. В связи с этим основная задача эксперимента в рамках горячего прессования состоит в определении критических пороговых значений температуры и давления, превышение которых приводит к недопустимому снижению содержания витамина Е и каротиноидов, при одновременном обеспечении максимально высокого выхода.

Таким образом, систематическое изучение и сопоставление влияния температуры, давления и продолжительности процесса при холодном и горячем прессовании позволит установить закономерности изменения выхода и качественных характеристик кедрового масла и определить рациональные технологические режимы. Цель исследования – обосновать рациональные технологические параметры холодного и горячего прессования кедрового масла и оценить их влияние на ключевые показатели качества и биологическую ценность получаемого продукта.

### Объекты и методы исследования

В качестве сырья использовали очищенное ядро кедрового ореха (*Pinus sibirica*) урожая 2024 г. (ООО «Кедр Экспорт», Кемерово, Россия). Качество и безопасность сырья подтверждены протоколом испытаний № 08/24 «Определение показателей качества образца кедрового ореха» от 22.11.2024 г., выполненных на базе лаборатории биотестирования природных нутрицевтиков ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет» (Кемерово, Россия). Согласно протоколу:

массовая доля влаги –  $2,53 \pm 0,23$  %; массовая доля белка –  $22,65 \pm 0,31$  %; жирнокислотный профиль (основные): линолевая кислота –  $46,22 \pm 2,31$  %, олеиновая –  $24,31 \pm 1,22$  %,  $\gamma$ -линоленовая –  $18,92 \pm 1,51$  %, пальмитиновая –  $4,26 \pm 0,47$  %, стеариновая –  $2,45 \pm 0,27$  %; содержание макро- и микроэлементов: калий –  $780,00 \pm 195,00$  мг/100 г, магний –  $230,00 \pm 46,00$  мг/100 г, фосфор –  $450,00 \pm 112,50$  мг/100 г, кальций –  $48,00 \pm 19,20$  мг/100 г, железо –  $2,19 \pm 0,44$  мг/100 г, цинк –  $4,60 \pm 1,15$  мг/100 г; водорастворимые витамины: В<sub>1</sub> –  $11,20 \pm 1,62$  мг/100 г, В<sub>3</sub> (РР) –  $11,16 \pm 1,86$  мг/100 г, В<sub>6</sub> –  $1,32 \pm 0,19$  мг/100 г. Микробиологические показатели: КМАФАнМ –  $(2 \pm 1) \times 10^1$  КОЕ/г, БГКП не обнаружены, дрожжи и плесени –  $(5 \pm 2) \times 10^1$  КОЕ/г, что соответствует требованиям ТР ТС 021/2011 «О безопасности пищевой продукции» и ГОСТ 31852-2012 «Орехи кедровые. Технические условия».

Известно, что влажность масличного сырья является критическим параметром, влияющим на эффективность извлечения масла. Чрезмерно низкая влажность (менее 5,5 %) может привести к перегреву прессующего оборудования и ухудшению показателей прессования<sup>1</sup>, слишком высокая – к формированию устойчивой эмульсии «масло в воде», затрудняющей ее разделение [29]. Техническими регламентами для сходных масличных культур установлено, что оптимальная влажность ядра перед прессованием находится в диапазоне от 5,5–6,5 до 6,0–8,0 %<sup>2</sup> согласно ГОСТ 31852-2012 «Орехи кедровые очищенные. Технические условия», указанные диапазоны влажности соответствуют требованиям к качеству сырья, используемого для прессования. Поскольку исходная влажность ядра кедрового ореха (*P. sibirica*) согласно протоколу № 08/24 от 22.11.2024 г. составляла  $2,53 \pm 0,23$  %, что ниже рекомендуемого диапазона, сырье подвергали кондиционированию. Для этого ядро кедрового ореха измельчали на лабораторной мельнице LM 3100 (Perten, Швеция) до  $2,0 \pm 0,1$  мм. Измельченную массу помещали в герметичный полиэтиленовый пакет и методом распыления вносили рассчитанное количество дистиллированной воды для достижения целевой влажности  $5,2 \pm 0,2$  % (из расчета 2,7 мл воды на 100 г сухого ядра). Увлажненную массу выдерживали при 4 °С в течение 24 ч с периодическим перемешиванием для равномерного распределения влаги. Данный диапазон влажности соответствует технологическим параметрам, указанным в патент-

ной литературе для переработки кедрового ореха<sup>3</sup>. Подготовленное сырье использовали для получения масла без дополнительной сушки.

Измельченное и кондиционированное ядро (влажность  $5,2 \pm 0,2$  %) подвергали прессованию на автоматическом гидравлическом термопрессе РСАН (KINTEK, Китай) с усилием до 25 т. Пресс оснащен подогревательными плитами (диапазон нагрева до 300 °С) и программируемой системой управления, позволяющей точно поддерживать температуру ( $\pm 1$  °С), давление и время выдержки. Для холодного прессования нагрев плит отключали. Температура при холодном прессовании находилась в пределах 10–35 °С, при горячем – от 60 до 85 °С с шагом 5 °С. Давление варьировали от 20 до 200 кг/см<sup>2</sup> с шагом 10 кг/см<sup>2</sup>, продолжительность прессования – от 5 до 40 мин с шагом 10 мин. Масса загрузки –  $100 \pm 2$  г. Очистку полученного масла от механических примесей проводили с использованием мембранной установки МФУ-Р-45-300 (ЗАО НПО «Элевар», Россия). После фильтрации масло отстаивали для удаления остаточного воздуха и направляли на промежуточное хранение.

Коммерческий образец для сравнения. В качестве референсного образца использовано кедровое масло холодного прессования «Эко-Сибирь» (Иркутск, Россия), приобретенное в розничной торговле (партия № 2311).

Выход масла ( $W$ , % к абсолютной сухой массе ядра) определяли гравиметрически согласно формуле (1), что соответствует общепринятой практике в масложировой промышленности<sup>4,5</sup>:

$$W = \frac{m_{\text{масла}} \times 100 \times 100}{m_{\text{ядра}} \times (100 - W_{\text{исх}})} \quad (1)$$

где  $m_{\text{масла}}$  – масса полученного масла, г;  $m_{\text{ядра}}$  – масса навески сырья, г;  $W_{\text{исх}}$  – влажность ядра после кондиционирования ( $5,2 \pm 0,2$  %).

Содержание токоферола (витамина Е) определяли методом высокоскоростной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ) по ГОСТ ISO 9936-2024. Навеску масла ( $1,00 \pm 0,01$  г) растворяли в гексане, доводили до 10 мл и фильтровали через мембранный фильтр с порами 0,45 мкм. Анализ проводили на ВЭЖХ-системе Shimadzu LC-20 (Shimadzu Corporation, Япония) с диодно-матричным детектором. Условия хроматографирования: колонка Phenomenex Luna C18 (Phenomenex, США) ( $150,0 \times 4,6$  мм, 5 мкм), подвижная фаза – метанол:вода (96:4), скорость потока 1,2 мл/мин, детектирование при  $\lambda = 292$  нм.

<sup>1</sup> Поставка технологического оборудования для прессования масличных семян методом предварительного прессования холодным способом производительностью 48–1152 тонн семян / сутки. URL: [http://pressservis.com/wp-content/uploads/2017/12/ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЕ-ПРЕССОВАНИЕСРР\\_FS1010.pdf](http://pressservis.com/wp-content/uploads/2017/12/ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЕ-ПРЕССОВАНИЕСРР_FS1010.pdf) (дата обращения 11.06.2026).

<sup>2</sup> Технологический режим работы оборудования при однократном прессовании: техническая информация. URL: <http://press-oil.ru/blog-mansory-2/item/32-tehnologicheskij-rezhim-raboty-oborudovaniya.html> (дата обращения 11.06.2026).

<sup>3</sup> Способ получения растительного масла и пищевого белкового продукта: патент 2198913 Рос. Федерация. № 2000129338 / Бахтин Ю. В., Мжелский А. Ф. заявл. 23.11.2000; опубл. 20.02.2003. 4 с. Бюл. № 5.

<sup>4</sup> ОФС. 1.5.3.0014 «Определение содержания жирных масел в лекарственном растительном сырье и лекарственных средствах растительного происхождения». Государственная фармакопея Российской Федерации. XV издание. 2023. Т. 2. С. 2339–2342.

<sup>5</sup> Лурье Ю. Ю. Справочник по аналитической химии. М.: Химия, 1989. 448 с.

Массовую долю влаги и летучих веществ определяли по ГОСТ 11812–2022 (метод высушивания в сушильном шкафу при  $103 \pm 2$  °С до постоянной массы).

Содержание фосфора, калия и магния выявляли методом атомно-эмиссионной спектроскопией с индуктивно связанной плазмой на приборе ICPE-9820 (Shimadzu Corporation, Япония) по МУК 4.1.1482-03. Пробоподготовка: навеску масла (0,5 г) озоляли в муфельной печи при 450 °С, золу растворяли в 2 %  $\text{HNO}_3$  (объем доводили до 10 мл). Длины волн: Р – 213,618 нм, К – 766,491 нм, Mg – 279,553 нм. Пределы количественного определения: 0,2 мг/100 г – для Р; 0,1 мг/100 г – для К и Mg.

Показатели качества кедрового масла устанавливали по стандартным методикам: йодное число – по ГОСТ 5475–69; кислотное число – по ГОСТ 31933–2012; число омыления – по ГОСТ 5478–2014; перекисное число – по ГОСТ 26593–85; плотность – согласно ГОСТ 18848–2019; показатель преломления – в соответствии с ГОСТ 5482–90; массовую долю нежировых примесей – по ГОСТ 5481–2014; массовую долю жира – по ГОСТ 10857–64; насыщенные и ненасыщенные жирные кислоты – по ГОСТ 30418–96.

Все измерения проводили в трехкратной повторности. Данные представлены как среднее арифметическое  $\pm$  стандартное отклонение ( $M \pm SD$ ). Статистическую обработку результатов выполняли с использованием критерия Стьюдента при доверительной вероятности  $p \leq 0,05$ .

### Результаты и их обсуждение

Экспериментально выявлены рациональные параметры холодного и горячего прессования ядер кедрового ореха, при которых достигается наибольший выход липидов и сохраняется повышенное содержание витамина Е и фосфора.

На начальном этапе проводили подбор температурного режима прессования ядер кедрового ореха: для холодного прессования – в диапазоне 10–35 °С с шагом 5 °С, для горячего – 60–85 °С с шагом 5 °С. При этом остальные технологические параметры поддерживали постоянными: давление составляло 100 кг/см<sup>2</sup>, продолжительность прессования – 30 мин. В числе показателей, характеризующих качество кедрового масла, использовали содержание витамина Е и фосфора, поскольку данные компоненты в значительной степени определяют его биологическую ценность. Зависимость выхода липидов от температурного режима прессования приведена в таблице 1.

При фиксированных давлении (100 кг/см<sup>2</sup>) и времени (30 мин) выход масла возрастал с повышением температуры для обоих методов. Максимальный выход при холодном прессовании ( $38,0 \pm 0,1$  %) достигнут при 20–35 °С. При горячем прессовании выход стабилизировался на уровне  $49,0 \pm 0,1$  % при 80–85 °С, однако оптимальной признана температура 75 °С (выход  $47,8 \pm 0,3$  %) с учетом сохранения качества.

Таблица 1. Зависимость выхода масла от температуры прессования ядра кедрового ореха

Table 1. Effect of temperature mode on pine oil yield

| Прессование | Температура, °С | Выход масла, %<br>к абсолютно сухой массе |
|-------------|-----------------|-------------------------------------------|
| Холодное    | 10              | $7,6 \pm 0,1$                             |
|             | 15              | $18,8 \pm 0,6$                            |
|             | 20              | $36,0 \pm 0,1$                            |
|             | 25              | $37,7 \pm 0,2$                            |
|             | 30              | $38,0 \pm 0,1$                            |
|             | 35              | $38,0 \pm 0,2$                            |
| Горячее     | 60              | $12,6 \pm 0,7$                            |
|             | 65              | $22,3 \pm 0,1$                            |
|             | 70              | $35,0 \pm 0,2$                            |
|             | 75              | $47,8 \pm 0,3$                            |
|             | 80              | $49,0 \pm 0,1$                            |
|             | 85              | $49,0 \pm 0,2$                            |

На рисунке 1 приведены результаты исследования влияния температурного режима прессования на физико-химические свойства кедрового масла.

Температура прессования существенно влияет на физико-химические показатели кедрового масла. С повышением температуры снижалась массовая доля влаги в масле: при 20 °С – 0,05 %; при 35 °С – 0,05 %; при 75 °С – 0,03 %.

Содержание витамина Е при холодном прессовании оставалось высоким – 76,5 мг/100 г, однако при горячем снижалось до 74,0 мг/100 г (75–85 °С). Содержание фосфора также несколько сокращалось при нагреве (с 877 до 855 мг/100 г).

Таким образом, рациональными температурными режимами приняты: для холодного прессования – 20 °С (максимальный выход без деструкции), для горячего прессования – 75 °С (высокий выход при сохранении качества).

В рамках следующего этапа исследования проводили подбор рациональной продолжительности прессования ядра кедрового ореха при фиксированных параметрах: температуре 20 °С – для холодного и 75 °С – для горячего прессования, а также давлении 100 кг/см<sup>2</sup>. Время прессования варьировалось в интервале от 5 до 40 мин. Зависимость выхода липидов от продолжительности прессования ядра кедрового ореха представлена в таблице 2<sup>6</sup>.

Наиболее значительный прирост при холодном прессовании наблюдался при увеличении продолжительности с 10 до 20 мин: в этом диапазоне выход липидов возрастает с  $17,8 \pm 0,3$  до  $35,5 \pm 0,7$  %. Дальнейшее увеличение времени (30–40 мин) практически не влияет на выход липидов: показатели меняются с  $35,8 \pm 1,1$  до  $36,5 \pm 0,7$  %, что находится в пределах

<sup>6</sup> Масло кедрового ореха. URL: <https://ecosibir.com/ru/catalog/maslo-keдрovogo-oreha/> (дата обращения 18.06.2026).

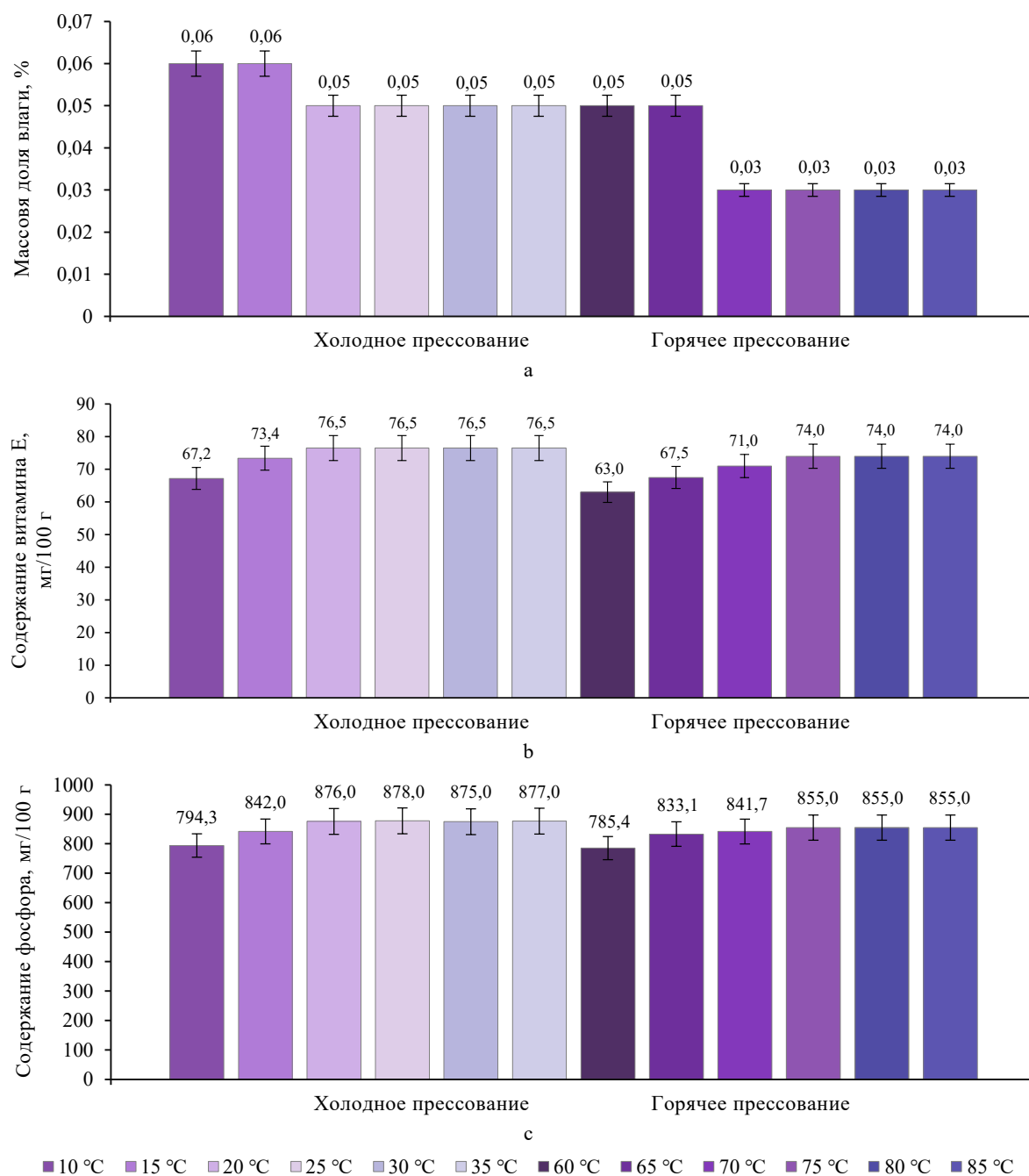


Рисунок 1. Физико-химическая характеристика кедрового масла в зависимости от температуры прессования:  
а – массовая доля влаги; б – содержание витамина Е; в – содержание фосфора

Figure 1. Effect of temperature mode on physico-chemical characteristics of pine nut oil: а – moisture; б – vitamin Е; and в – phosphorus

Таблица 2. Зависимость выхода масла от продолжительности прессования ядра кедрового ореха

Table 2. Effect of pressing time on pine nut oil yield

| Продолжительность, мин | Выход масла, % к абсолютно сухой массе |                     |
|------------------------|----------------------------------------|---------------------|
|                        | Холодное прессование                   | Горячее прессование |
| 5                      | 15,0 ± 0,2                             | 21,0 ± 0,3          |
| 10                     | 17,8 ± 0,3                             | 23,6 ± 0,4          |
| 20                     | 35,5 ± 0,7                             | 47,5 ± 0,7          |
| 30                     | 35,8 ± 1,1                             | 47,8 ± 0,7          |
| 40                     | 36,5 ± 0,7                             | 48,0 ± 0,7          |



погрешности измерений. Следовательно, рациональная продолжительность для холодного прессования составляет 20 мин. Более длительное прессование не даст значительного прироста выхода масла.

При горячем прессовании уже к 10 мин выход достигал  $23,6 \pm 0,4$  %. Резкий рост фиксируется при увеличении времени до 20 мин: выход масла в этом случае –  $47,5 \pm 0,7$  %. При дальнейшем увеличении продолжительности (30–40 мин) прирост минимален –

с  $47,8 \pm 0,7$  до  $48,0 \pm 0,7$  %. Оптимальная продолжительность для горячего прессования также определена как 20 мин. Увеличение времени свыше этого значения не приводит к существенному росту выхода масла.

Кроме того, установлена связь между продолжительностью прессования и физико-химическими показателями кедрового масла (рис. 2). Аналогичная закономерность наблюдалась для влажности, витамина Е и фосфора. Рациональный временной режим для мини-

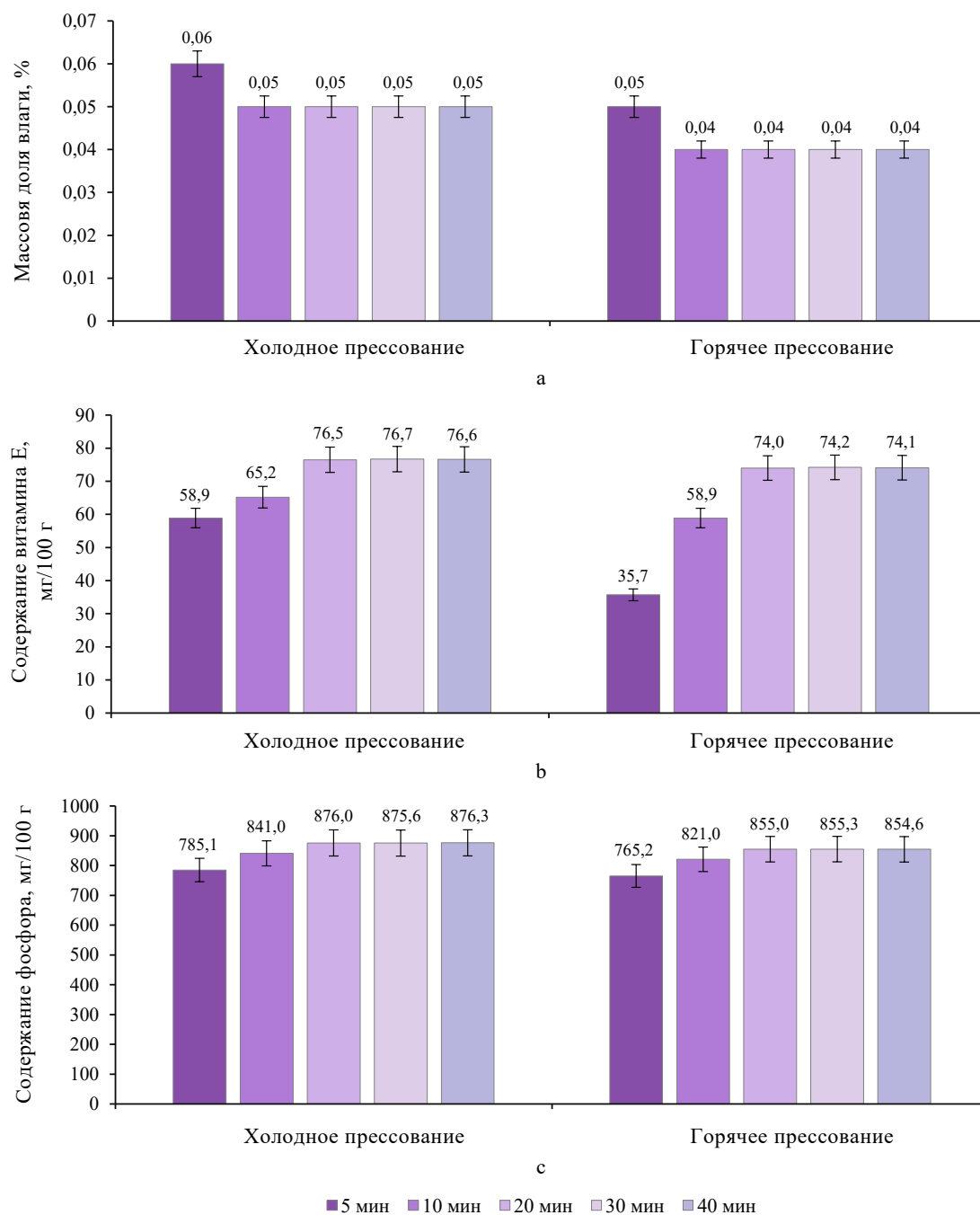


Рисунок 2. Физико-химические показатели кедрового масла в зависимости от продолжительности прессования: а – массовая доля влаги; б – содержание витамина Е; с – содержание фосфора

Figure 2. Effect of pressing time on physico-chemical parameters of pine nut oil: а – moisture; б – vitamin Е; and с – phosphorus

Таблица 3. Зависимость выхода масла от давления прессования ядра кедрового ореха

Table 3. Effect of pressure mode on pine nut oil yield

| Давление, кг/см <sup>2</sup> | Выход масла, % к абсолютно сухой массе |                     |
|------------------------------|----------------------------------------|---------------------|
|                              | Холодное прессование                   | Горячее прессование |
| 20                           | 23,4 ± 0,5                             | 27,8 ± 0,3          |
| 40                           | 27,8 ± 0,3                             | 34,5 ± 0,4          |
| 60                           | 29,7 ± 0,6                             | 39,5 ± 0,2          |
| 80                           | 32,1 ± 0,7                             | 44,5 ± 0,4          |
| 100                          | 35,5 ± 0,1                             | 47,5 ± 0,1          |
| 120                          | 37,0 ± 0,2                             | 52,3 ± 0,7          |
| 140                          | 42,4 ± 0,1                             | 57,3 ± 0,5          |
| 160                          | 44,8 ± 0,9                             | 57,1 ± 0,1          |
| 180                          | 45,4 ± 0,5                             | 57,5 ± 0,2          |
| 200                          | 45,3 ± 0,2                             | 57,2 ± 0,7          |

Таблица 4. Физико-химические показатели кедрового масла

Table 4. Physico-chemical parameters of pine nut oil

| Показатель                                                               | Значение             |                     |
|--------------------------------------------------------------------------|----------------------|---------------------|
|                                                                          | Холодное прессование | Горячее прессование |
| Йодное число, г I <sub>2</sub> /100 г                                    | 154,0 ± 7,7          | 158,0 ± 7,9         |
| Кислотное число, мг КОН/г                                                | 0,9 ± 0,2            | 0,8 ± 0,2           |
| Число омыления, мг КОН/г                                                 | 190,0 ± 9,5          | 192,0 ± 9,6         |
| Массовая доля влаги и летучих веществ, %                                 | 0,020 ± 0,002        | 0,030 ± 0,003       |
| Массовая доля нежировых примесей (отстой по массе), %                    | 0,07 ± 0,10          | 0,09 ± 0,1          |
| Перекисное число, ммоль О <sub>2</sub> /кг                               | 7,5 ± 0,4            | 8,7 ± 0,4           |
| Показатель преломления при 40 °С                                         | 1,4685 ± 0,0734      | 1,4688 ± 0,0734     |
| Плотность при 20 °С, г/м <sup>3</sup>                                    | 0,919 ± 0,046        | 0,922 ± 0,046       |
| Массовая доля жира, %, не менее                                          | 99,9 ± 5,0           | 99,9 ± 5,0          |
| Массовая доля насыщенных жирных кислот от общей массы жирных кислот, %   | 7,5 ± 0,4            | 7,5 ± 0,4           |
| Массовая доля ненасыщенных жирных кислот от общей массы жирных кислот, % | 92,5 ± 4,6           | 92,5 ± 4,6          |
| Содержание витамина Е, мг/100 г                                          | 78,0 ± 3,9           | 75,8 ± 3,8          |
| Содержание фосфора, мг/100 г                                             | 887,5 ± 44,4         | 871,0 ± 43,6        |
| Содержание калия, мг/100 г                                               | 694,0 ± 34,7         | 681,0 ± 34,0        |
| Содержание магния, мг/100 г                                              | 622,0 ± 31,1         | 607,0 ± 30,3        |

мизации содержания влаги, сохранения витамина Е и фосфора – 20 мин. Дальнейшее увеличение времени (30–40 мин) практически не влияет на исследуемые показатели: все параметры достигают плато.

Давление – наиболее значимый фактор ( $p < 0,001$ ). Эксперимент проводили при оптимальных параметрах: температура (20 °С – для холодного прессования, 75 °С – для горячего), время – 20 мин. Результаты зависимости выхода масла от давления прессования ядра кедрового ореха отражены в таблице 3.

Установлено, что рациональное давление при холодном прессовании кедрового масла составляет 160 кг/см<sup>2</sup> (выход – 44,8 ± 0,9 %), при горячем – 140 кг/см<sup>2</sup> (выход – 57,3 ± 0,5 %). Дальнейшее повышение давления сопровождается незначительным изменением выхода масла, что не компенсирует увеличение интенсивности процесса.

На заключительном этапе исследования оценено влияние давления прессования на физико-химические характеристики кедрового масла (рис. 3).

Содержание витамина и фосфора незначительно зависело от давления в диапазоне 120–200 кг/см<sup>2</sup>. Оптимальное давление для минимизации потерь влаги – 120–140 кг/см<sup>2</sup>. Дальнейшее его увеличение приводит лишь к незначительному изменению показателей.

На основании трехфакторных экспериментов определены рациональные режимы. Для метода холодного прессования оптимальны: температура 20 °С, давление 160 кг/см<sup>2</sup> и продолжительность 20 мин. Для горячего прессования – температура 75 °С, давление 140 кг/см<sup>2</sup> и продолжительность 20 мин.

Для полученного кедрового масла оценивали выход и показатели качества (табл. 4). В качестве критериев

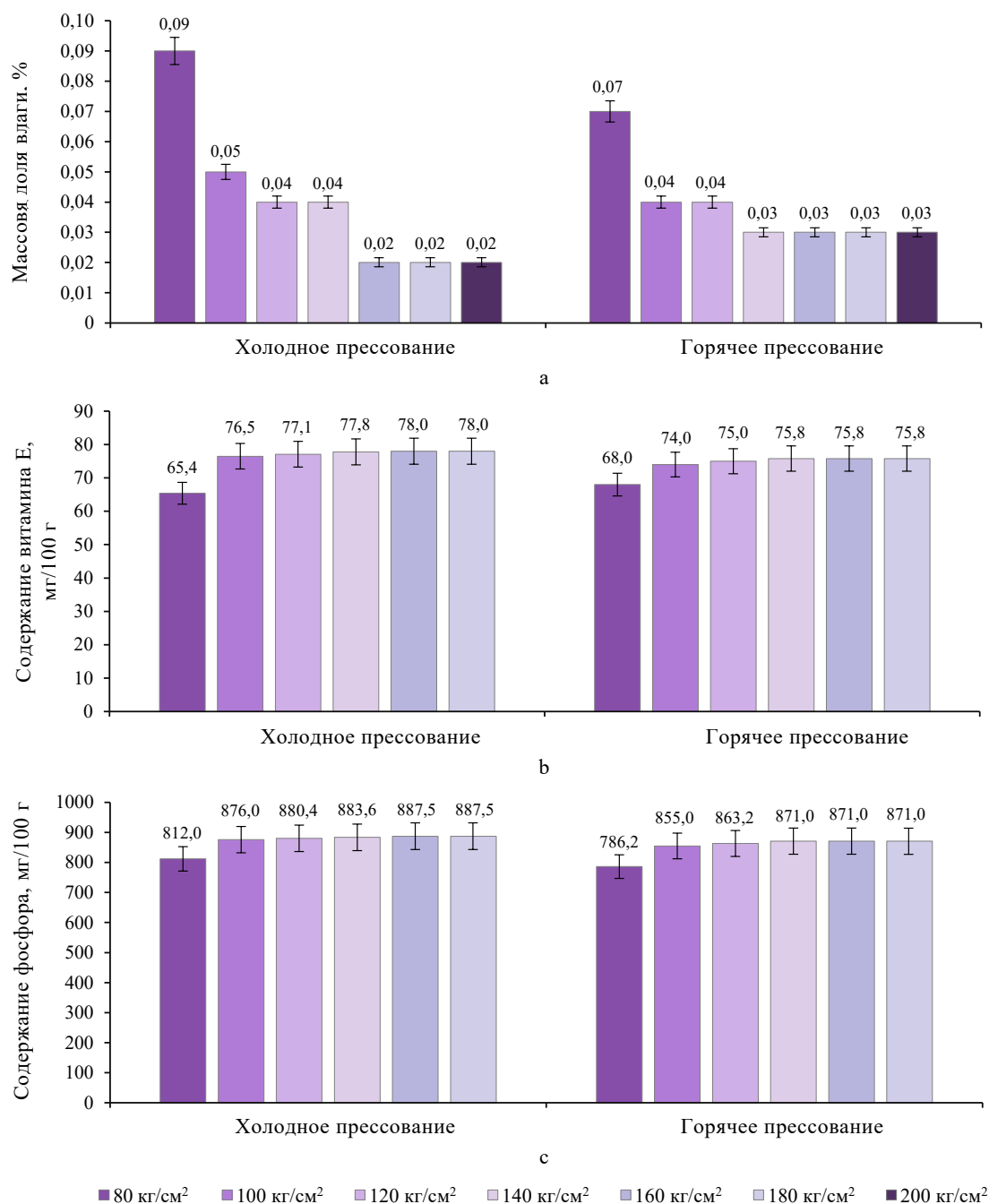


Рисунок 3. Физико-химические показатели кедрового масла в зависимости от давления прессования:  
а – массовая доля влаги; б – содержание витамина Е; в – содержание фосфора

Figure 3. Effect of pressure mode on physico-chemical parameters of pine nut oil: а – moisture; б – vitamin Е; and в – phosphorus

выбраны: содержание витамина Е, фосфора, калия и магния, поскольку данные компоненты определяют биологическую ценность кедрового масла.

По содержанию витамина Е, фосфора, калия и магния кедровое масло, полученное методом холодного прессования, превосходит масло горячего прессования (различия составляют 2,8–9,3 % в зависимости от показателя), что обусловлено частичной деградацией термолабильных биоактивных соединений при

нагревании. Кроме того, холодное прессование обеспечивает более низкие значения массовой доли влаги, перекисного и кислотного числа, что свидетельствует о меньшей степени окислительных процессов и лучшей сохранности продукта. Показатели преломления, плотности, а также соотношение насыщенных и ненасыщенных жирных кислот для обоих образцов практически идентичны и соответствуют типичному профилю кедрового масла. Таким образом, холодное

Таблица 5. Физико-химические показатели коммерческого образца кедрового масла («Эко-Сибирь», Иркутск, Россия)

Table 5. Physico-chemical parameters of commercial pine nut oil (Eco-Siberia, Irkutsk, Russia)

| Показатель                                                               | Значение |
|--------------------------------------------------------------------------|----------|
| Массовая доля влаги и летучих веществ, %                                 | 0,08     |
| Массовая доля насыщенных жирных кислот от общей массы жирных кислот, %   | 11,19    |
| Массовая доля ненасыщенных жирных кислот от общей массы жирных кислот, % | 92,50    |
| Содержание витамина Е, мг/100 г                                          | 55,00    |
| Содержание фосфора, мг/100 г                                             | 840,00   |
| Содержание калия, мг/100 г                                               | 650,00   |
| Содержание магния, мг/100 г                                              | 552,00   |

прессование позволяет получить масло с более высокой биологической ценностью, тогда как горячее, уступая по качеству, обеспечивает существенно больший выход продукта (табл. 3). Тем не менее, оба образца характеризуются высокой биологической ценностью по сравнению с коммерческим аналогом (табл. 5)<sup>7</sup>.

Разработанные режимы холодного прессования позволяют получить масло с более высоким содержанием витамина Е – в 1,40 раза, фосфора – в 1,05 раза, калия – в 1,07 раза и магния – в 1,13 раза. Масло горячего прессования также превосходит коммерческий образец: по витамину Е – в 1,38 раза, фосфору – в 1,04 раза, калию – в 1,05 раза, магнию – в 1,10 раза, при этом обеспечивая более высокий выход продукта (57,3 % против 44,8 % у холодного прессования).

### Выводы

В ходе исследования проведено экспериментальное обоснование рациональных технологических режимов холодного и горячего прессования ядра кедрового ореха (*Pinus sibirica*), обеспечивающих максимальный выход масла при сохранении его биологической ценности. На основании комплексного анализа влияния температуры, давления и продолжительности прессования на выход и физико-химические показатели масла установлены следующие основные результаты:

Экспериментально определены рациональные режимы получения кедрового масла: для холодного прессования – температура 20 °С, давление 160 кг/см<sup>2</sup>, продолжительность 20 мин (выход масла 44,8 ± 0,9 %); для горячего прессования – температура 75 °С, давление 140 кг/см<sup>2</sup>, продолжительность 20 мин (выход масла 57,3 ± 0,5 %).

Подтверждено, что нагревание выше 75 °С при горячем прессовании не приводит к значительному увеличению выхода масла, но сопровождается снижением содержания витамина Е, фосфора, калия и магния, что свидетельствует о частичной деградации термолабильных биологически активных соединений.

Давление является наиболее значимым фактором, влияющим на выход масла ( $p < 0,001$ ). Оптимальное дав-

ление для холодного прессования составляет 160 кг/см<sup>2</sup>, для горячего – 140 кг/см<sup>2</sup>. Дальнейшее повышение давления до 200 кг/см<sup>2</sup> экономически нецелесообразно из-за незначительного прироста выхода при увеличении энергозатрат.

Продолжительность прессования свыше 20 мин не оказывает существенного влияния на выход и качество масла ( $p > 0,05$ ), что позволяет рекомендовать данный временной интервал как оптимальный для обоих способов прессования.

Разработанный режим холодного прессования обеспечивает получение кедровое масло, превосходящее коммерческий образец «Эко-Сибирь» (Иркутск, Россия) по содержанию витамина Е – в 1,40 раза, фосфора – в 1,05 раза, калия – в 1,07 раза и магния – в 1,13 раза. Горячее прессование также дает значительное превосходство над аналогом при существенно большем выходе.

Результаты могут быть использованы при проектировании технологических линий для малых и средних предприятий по переработке дикоросов.

### Критерии авторства

В. А. Потураев, Е. С. Миллер – методология и редактирование статьи. Т. А. Ларичев, О. Г. Альтшулер – формальный анализ. И. С. Милентьева – концептуализация и редактирование статьи. Все авторы одобрили финальную версию рукописи.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, связанного с публикацией данной статьи.

### Contribution

V.A. Poturaev, E.S. Miller developed the methodology and edited the article. T.A. Larichev, O.G. Altshuler performed the formal analysis. I.S. Milentyeva conceptualized and edited the article. All authors approved the final version of the manuscript.

### Conflict of interest

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

<sup>7</sup> Масло кедрового ореха...



## Список литературы / References

1. Австриевских А. Н., Вековцев А. А., Челнакова Н. Г., Позняковский В. М. Продукты здорового питания: новые технологии, обеспечение качества, эффективность применения. Новосибирск: Сибирское университетское издательство, 2005. 413 с. [Avstrieviskikh AN, Vekovtsev AA, Chelnakova NG, Poznyakovskiy VM. Healthy food products: New technologies, quality assurance, and application efficiency. Novosibirsk: Siberian University; 2005. 413 p. (In Russ.)]
2. Тыщенко Е. А., Титоренко Е. Ю., Рогалевская Н. В., Попова Д. Г. Формирование качественных характеристик специализированного продукта с использованием местного растительного сырья. Техника и технология пищевых производств. 2014. Т. 34. № 3. С. 84–90. [Tyshchenko EA, Titorenko EYu, Rogalevskaya NV, Popova DG. Quality characteristics of functional foods using local plant raw materials. Food Processing: Techniques and Technology. 2014;34(3):84–90. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/SNMHLX>
3. Babich O, Prosekov A, Noskova S, Sukhikh S, Dyshlyuk L, et al. In vivo study of the potential of the carbohydrate-mineral complex from pine nut shells as an ingredient of functional food products. Bioactive Carbohydrates and Dietary Fibre. 2019;18:100185. <https://doi.org/10.1016/j.bcdf.2019.100185>
4. Vesnina AD, Milentyeva IS, Le VM, Fedorova AM, Altschuler OG, Prosekov AYU. 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>
5. Babich O, Larina V, Krol O, Ulrikh E, Sukhikh S, Gureev MA, Prosekov A, Ivanova S. In vitro study of biological activity of *Tanacetum vulgare* extracts. Pharmaceutics. 2023;15(2):616. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics15020616>
6. Asyakina L, Atuchin V, Drozdova M, Kozlova O, Prosekov A. Ex vivo and in vitro antiaging and antioxidant extract activity of the *Amelanchier ovalis* from Siberia. International Journal of Molecular Sciences. 2022;23(23):15156. <https://doi.org/10.3390/ijms232315156>
7. 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>
8. Rathod ML, Angadi BM, Bhavi IG. A review on optimization of process parameters of cold pressed oil extraction for high output and for enhanced quality and retained nutrients. Food and Humanity. 2025;5:100698. <https://doi.org/10.1016/j.fooHum.2025.100698>
9. Prosekov AYU, Dyshlyuk LS, Milentyeva IS, Pavsky VA, Ivanova SA, et al. Study of the biofunctional properties of cedar pine oil with the use of in vitro testing cultures. Foods and Raw Materials. 2018;6(1):136–143. <http://doi.org/10.21603/2308-4057-2018-1-136-143>
10. Takala R, Ramji DP, Andrews R, Zhou Y, Farhat M, et al. Pinolenic acid exhibits anti-inflammatory and anti-atherogenic effects in peripheral blood-derived monocytes from patients with rheumatoid arthritis. Scientific Reports. 2022;12(1):8807. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-12763-8>
11. Takala R, Ramji DP, Choy E. The beneficial effects of pine nuts and its major fatty acid, pinolenic acid, on inflammation and metabolic perturbations in inflammatory disorders. International Journal of Molecular Sciences. 2023;24(2):1171. <https://doi.org/10.3390/ijms24021171>
12. Zhu J, Li ZH, Wang Y, Mu ZH, Lv X, et al. A review on improving the oxidative stability of pine nut oil in extraction, storage, and encapsulation. Antioxidants. 2025;14(6):716. <https://doi.org/10.3390/antiox14060716>
13. Zhamsaranova SD, Shiretorova VG, Lebedeva SN, Erdyneeva SA, Tykheev AA, et al. By-products of *Pinus pumila* (Pall.) regel in adaptogenic functional foods. Foods and Raw Materials. 2027;15(1):155–170. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2027-1-700>
14. Baker EJ, Miles EA, Calder PC. A review of the functional effects of pine nut oil, pinolenic acid and its derivative eicosatrienoic acid and their potential health benefits. Progress in Lipid Research. 2021;82:101097. <https://doi.org/10.1016/j.plipres.2021.101097>
15. Subbotina MA, Dolgolyuk IV. Study of composition and biological value of pinon kernel of Siberian pine. Foods and Raw materials. 2015;3(1):56–61. <https://doi.org/10.12737/11238>
16. Santos OV, Freires SCV, Palheta HCDEO, Ferreira PHDEM. Impact of use of ultrasound-assisted extraction on the quality of Brazil nut oil (*Bertholletia excelsa* HBK). Separations. 2025;12(7):182. <https://doi.org/10.3390/separations12070182>
17. Incegul Y, Aksu M, Kiralan SS, Kiralan M, Ozkan G. Cold pressed pine (*Pinus koraiensis*) nut oil. In: Ramadan MF, editor. Cold pressed oils: Green technology, bioactive compounds, functionality, and applications. London: Academic Press; 2020. pp. 525–536. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818188-1.00047-5>
18. Hamitbek AH, Kairbaeva AE. Experimental studies for the Development of special equipment for cleaning cedar nuts from the shell. Complex Use of Mineral Resources. 2025;333(2):34–40. <https://doi.org/10.31643/2025/6445.15>
19. Невзоров В. Н., Кох Ж. А., Мацкевич И. В., Холопов В. Н. Совершенствование технологии и оборудования производства кедрового масла. Хвойные бореальной зоны. 2022. Т. 40. № 5. С. 444–449. [Nevzorov VN, Koch ZhA, Matskevich IV, Kholopov VN. Improvement of technology and equipment cedar oil production. Conifers of the Boreal Area. 2022;40(5):444–449. (In Russ.)] <https://doi.org/10.53374/1993-0135-2022-5-444-449>

20. Kemerli-Kalbaran T, Ozdemir M. Multi-response optimization of oil extraction from pine nut (*Pinus pinea* L.) by response surface methodology: Extraction efficiency, physicochemical properties and antioxidant activity. LWT. 2019;103:34–43. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.12.067>
21. Хантургаев А. Г., Бадмацыренов Б. В., Ширеторова В. Г., Хантургаева Г. И. Получение кедрового масла из семян сосны сибирской экстракцией этиловым спиртом. Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. 2003. № 1. С. 34–37. [Khanturgaev AG, Badmatsyrenov BV, Shiretorova VG, Khanturgaeva GI. Production of pine nut oil from Siberian cedar pine seeds using ethyl alcohol extraction. Proceedings of Higher Educational Institutions. Food Technology. 2003;(1):34–37. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/QCUTWZ>
22. Ефремов А. А. Перспективы малотоннажной переработки кедровых орехов в продукты пищевого и технического назначения. Химия растительного сырья. 1998. № 3. С. 83–86. [Efremov AA. Prospects for low-volume processing of pine nuts into food and technical products. Chemistry of Plant Raw Materials. 1998;(3):83–86. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/hyssit>
23. Kaseke T, Opara UL, Fawole OA. Novel seeds pretreatment techniques: Effect on oil quality and antioxidant properties: A review. Journal of Food Science and Technology. 2021;58(12):4451–4464. <https://doi.org/10.1007/s13197-021-04981-1>
24. Lixia HOU, Cuicui LI, Jihong QIU. Comparison of the physicochemical characteristics of *Pinus koraiensis* L. nut oils from different extraction technologies. Grain & Oil Science and Technology. 2018;1(3):113–118. <https://doi.org/10.3724/SP.J.1447.GOST.2018.18042>
25. Rathod ML, Angadi BM, Bhavi IG. A review on optimization of process parameters of cold pressed oil extraction for high output and for enhanced quality and retained nutrients. Food and Humanity. 2025;5:100698. <https://doi.org/10.1016/j.foohum.2025.100698>
26. Nde DB, Foncha AC. Optimization methods for the extraction of vegetable oils: A review. Processes. 2020;8(2):209. <https://doi.org/10.3390/pr8020209>
27. Zhang Y, Zeng W, Liu YU, Wang X. Pine nut oil as a functional alternative to corn oil: Process selection, provenance profiling, and multi-omics evidence of lipid-lowering efficacy in Western-diet mice. Food Research International. 2025; 227:118175. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2025.118175>
28. Piravi-Vanak Z, Dadazadeh A, Azadmard-Damirchi S, Torbati M, Martinez F, *et al.* The effect of extraction by pressing at different temperatures on sesame oil quality characteristics. Foods. 2024;13(10):1472. <https://doi.org/10.3390/foods13101472>
29. Lazouk M-A, Savoie R, Kaddour A, Castello J, Lanoisellé J-L, *et al.* Oilseeds sorption isotherms, mechanical properties and pressing: Global view of water impact. Journal of Food Engineering. 2015;148:26–33. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2014.12.008>

#### Дополнительная информация об авторах / Additional information about the authors

Потураев Вячеслав Алексеевич / Vyacheslav A. Poturaev ORCID 0000-0001-9558-7497; eLIBRARY SPIN 3891-2755  
Миллер Екатерина Сергеевна / Ekaterina S. Miller ORCID 0000-0002-7538-8076; eLIBRARY SPIN 3354-7356  
Ларичев Тимофей Альбертович / Timothy A. Larichev ORCID 0000-0003-0166-2527; eLIBRARY SPIN 9005-9809  
Альтшулер Ольга Генриховна / Olga G. Altshuler ORCID 0000-0001-7035-673X; eLIBRARY SPIN 8700-3836  
Милентьева Ирина Сергеевна / Irina S. Milentyeva ORCID 0000-0002-3536-562X; eLIBRARY SPIN 8227-2844

<https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-3-2660>  
<https://elibrary.ru/OCPWEY>

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

## Fermented *Sargassum*-Based Seafood Rice Seasoning: Prototype Development and Mix Design Optimization



Bui Thi Thu Hien\*, Pham Thi Diem, Dang Van An,  
Pham Thi Duyen, Nguyen Van Nguyen, Nguyen Khac Bat

Vietnam Academy of Fishery Sciences, Bac Ninh, Vietnam

Received: 02.07.2026

Revised: 27.08.2026

Accepted: 01.09.2026

\*e-mail: [btthien2@mae.gov.vn](mailto:btthien2@mae.gov.vn)

© B.T.T. Hien, P.T. Diem, D.V. An, P.T. Duyen, N.V. Nguyen,  
N.K. Bat, 2026



### Abstract.

Direct incorporation of brown-seaweed biomass into foods is limited by its fibrous texture and by the challenge of retaining desirable marine and umami notes without an excessive fishy odor. This study evaluated whether fermented commercial *Sargassum* spp. biomass could be incorporated into a dry seafood seasoning for rice and whether a constrained mix design could identify a formulation with high preliminary hedonic acceptability.

Commercial dried *Sargassum* spp. biomass was rehydrated for 6 h, washed, pretreated with 1.5% sodium bicarbonate at 90–100°C for 2 h, reduced to 1–2-mm fragments, and fermented with a mixed lactic starter containing *Companilactobacillus farciminis* and *Lactiplantibacillus pentosus*. The fermentation involving 2.15% starter culture and 5.0% sugar lasted for 86 h at 30°C. The methods of hot-air, low-temperature, and freeze drying were compared using moisture content and handling attributes. Seven variable ingredients were optimized within predefined ranges in an 18-run constrained mix design comprising 15 unique formulations. The response was the mean overall hedonic score for each run, based on evaluations by 30 assessors on a nine-point scale.

The fermented biomass had a pH of  $4.56 \pm 0.05$ . The freeze-drying processing at  $-50 \pm 2^\circ\text{C}$  for 40 h yielded material with  $4.51 \pm 0.20\%$  moisture and a crisp, loose, non-clumped structure. It was selected on the basis of handling properties. The drying routes were not compared by nutrient or volatile retention. The first-order mix model was significant ( $F = 45.40$ ,  $p < 0.001$ ,  $R^2 = 96.12\%$ , adjusted  $R^2 = 94.00\%$ ). The selected formulation comprised 30% fermented seaweed biomass, 10% *Porphyra/Pyropia*-type dried red seaweed, 10% dried tuna, 5% dried shrimp, 25% roasted sesame, 10% mung bean, 5% carrot, 3% sugar, and 2% sodium chloride. The observed acceptability score was  $8.30 \pm 0.54$  versus a predicted score of 8.43. The final product contained  $4.64 \pm 0.30\%$  moisture,  $28.50 \pm 1.58\%$  protein,  $15.30 \pm 0.32\%$  total ash, and  $15.00 \pm 0.64\%$  lipid on an as-received basis.

The sequential combination of fermentation, drying-route selection, and constrained mix optimization demonstrated the feasibility of the tested prototype and identified a formulation for independent confirmation. Because the selected solution lay on several formulation bounds, it represents the most favorable region within the tested domain rather than a universal optimum. The evidence was limited to preliminary hedonic testing and did not establish nutrient retention, shelf-life stability, comprehensive food safety, health effects, or market-level acceptance.

**Keywords.** Acidification, hedonic acceptability, *Sargassum* spp. biomass, drying, fermentation, formulation, mix design, pseudo-components, rice seasoning, valorization

**Funding.** This research was supported by the pilot production project “Ứng dụng công nghệ sinh học để sản xuất một số sản phẩm giá trị gia tăng từ rong biển kinh tế” [Application of biotechnology to produce value-added products from commercially important seaweeds].

**For citation:** Hien BTT, Diem PT, An DV, Duyen PT, Nguyen NV, *et al.* Fermented *Sargassum*-Based Seafood Rice Seasoning: Prototype Development and Mix Design Optimization. Food Processing: Techniques and Technology. 2026;56(3):556–564. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-3-2660>

## Приправа для риса на основе ферментированных водорослей (*Sargassum* spp.): разработка рецептуры и оптимизация компонентного состава



Буй Тхи Тху Хиен\*<sup>ORCID</sup>, Фам Тхи Дием<sup>ORCID</sup>, Данг Ван Ан<sup>ORCID</sup>,  
Фам Тхи Зуен, Нгуен Ван Нгуен, Нгуен Кхак Бат<sup>ORCID</sup>

Вьетнамская академия рыбохозяйственных наук, Бакнинь, Вьетнам

Поступила в редакцию: 02.07.2026

Принята после рецензирования: 27.08.2026

Принята к публикации: 01.09.2026

\*e-mail: [btthien2@mae.gov.vn](mailto:btthien2@mae.gov.vn)

© Б. Т. Т. Хиен, Ф. Т. Дием, Д. В. Ан, Ф. Т. Зуен, Н. В. Нгуен,  
Н. К. Бат, 2026



### Аннотация.

Волокнистая текстура бурых водорослей осложняет их прямое включение в рецептуру пищевых продуктов. Кроме того, сложно сохранить желаемые морские ноты и вкус умами без появления избыточного рыбного запаха. В данном исследовании оценивали возможность включения ферментированной биомассы водорослей *Sargassum* spp. в состав сухой приправы для риса, а также возможность применения метода планирования эксперимента с ограничениями для определения компонентного состава с высокой предварительной потребительской приемлемостью.

Сухую биомассу морских водорослей (*Sargassum* spp.) регидратировали в течение 6 ч, промывали и обрабатывали 1,5 % раствором бикарбоната натрия при температуре 90–100 °С в течение 2 ч. Затем сырье измельчали до размера частиц 1–2 мм и ферментировали смешанной молочнокислой закваской (*Companilactobacillus farciminis*, *Lactiplantibacillus pentosus*). Процесс проводили при температуре 30 °С в течение 86 ч с внесением 2,15 % закваски и 5 % сахара. Методы конвективной, низкотемпературной и сублимационной сушки сравнивали по содержанию влаги и технологическим свойствам полученного продукта. Эксперимент с ограничениями по получению оптимального компонентного состава включал 18 опытов и 15 уникальных рецептов; в пределах заданных диапазонов оптимизировали соотношение семи переменных ингредиентов. Среднюю гедонистическую оценку для каждого варианта определяли на основе данных, полученных от 30 дегустаторов (9-балльная шкала).

Ферментированная биомасса характеризовалась рН  $4,56 \pm 0,05$ . Материал, полученный методом сублимационной сушки при  $-50 \pm 2$  °С в течение 40 ч, имел хрустящую, рыхлую, рассыпчатую структуру и содержание влаги  $4,51 \pm 0,20$  %. Его выбрали из-за продемонстрированных при обработке свойств. Способы сушки не сравнивались по сохранению питательных или летучих веществ. Модель смеси первого порядка оказалась значимой ( $F = 45,40$ ,  $p < 0,001$ ,  $R^2 = 96,12$  %, скорректированный  $R^2 = 94,00$  %). Оптимальная рецептура включала 30 % ферментированной биомассы морских водорослей, 10 % сушеных красных морских водорослей *Porphyra/Pyropia*, 10 % сушеного тунца, 5 % сушеных креветок, 25 % жареного кунжута, 10 % маша (бобы мунг), 5 % моркови, 3 % сахара и 2 % хлорида натрия. Наблюдаемая оценка приемлемости составила  $8,30 \pm 0,54$ , тогда как прогнозируемая оценка – 8,43. Полученный продукт в исходном состоянии содержал  $4,64 \pm 0,30$  % влаги,  $28,50 \pm 1,58$  % белка,  $15,30 \pm 0,32$  % золы и  $15,00 \pm 0,64$  % липидов.

Последовательное сочетание ферментации, выбора способа сушки и оптимизации рецептурного состава методом планирования эксперимента с ограничениями доказало перспективность тестируемого прототипа и позволило определить рецептуру для независимого подтверждения результатов. Поскольку выбранный вариант оказался на стыке нескольких установленных ограничений, он представляет собой наиболее оптимальную зону в рамках исследованных параметров, а не абсолютный оптимум. Полученные данные ограничены предварительными гедонистическими тестами и не позволяли оценить сохранение питательных веществ, стабильность при хранении, полную безопасность продукта, его влияние на здоровье и востребованность на рынке.

**Ключевые слова.** Закисление, гедонистическая приемлемость, биомасса *Sargassum* spp., сушка, ферментация, рецептура, проектирование смеси, псевдокомпоненты, приправа для риса, повышение ценности продукта

**Финансирование.** Исследование подготовлено в рамках пилотного проекта по применению биотехнологий для производства продуктов с добавленной стоимостью из морских водорослей.

**Для цитирования:** Хиен Б. Т. Т., Дием Ф. Т., Ан Д. В., Зуен Ф. Т., Нгуен Н. В. и др. Приправа для риса на основе ферментированных водорослей (*Sargassum* spp.): разработка рецептуры и оптимизация компонентного состава. Техника и технология пищевых производств. 2026. Т. 56. № 3. С. 556–564. (На англ.) <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-3-2660>



## Introduction

Rice seasonings, such as Japanese furikake, are dry, portionable products used to add flavor and texture to rice and other ready-to-eat foods. Seaweed, sesame, and dried seafood are established ingredient classes in furikake-type formulations, and recent work confirms their continued relevance to seasoning development [1].

Seaweeds contribute minerals, dietary fiber, polysaccharides, and characteristic marine flavors to food products. Moderate marine and umami notes may enhance product identity, whereas pronounced fishy odor can reduce acceptance. Product development therefore requires control of both the physical form of seaweed and its sensory intensity rather than simply maximizing its proportion. Commercial *Sargassum* biomass varies with species composition, harvest conditions, and postharvest handling. As a result, conclusions should be restricted to the tested biomass and processing window rather than generalized across the genus [2, 3]. In Vietnam, commercial *Sargassum* biomass is locally available, but its direct use in formulated convenience seasonings remains less developed than extraction-based applications.

Fermentation was used to acidify the biomass and improve its suitability for subsequent drying and blending. Lactic fermentation is a popular processing method for macroalgal substrates, although its effects vary with the seaweed, microbial culture, and processing conditions [4–6]. A mixed culture of *Companilactobacillus farciminis* and *Lactiplantibacillus pentosus* served as the lactic starter. Starter cultures were not compared, and volatile compounds were not quantified. Accordingly, the study did not attribute aroma modification to a strain-specific biochemical mechanism.

The study integrated fermented *Sargassum*-based biomass with drying-route selection and constrained optimization of a seven-component seasoning mix. This linkage matters because a drying process may achieve low moisture yet yield a hard or clumped ingredient that disperses poorly in a dry seasoning. Mix design is a well-established protocol, which was applied here to a defined product-development problem within explicit ingredient bounds. Specifically, the research characterized the fermented biomass, selected the optimal drying route based on moisture and handling properties, optimized the seasoning formulation, compared the predicted and the observed acceptability for the selected formulation, and determined its proximate composition. The study did not evaluate health effects, market-level consumer acceptance, shelf life, or comprehensive product safety.

## Study objects and methods

**Raw materials.** Commercial dried *Sargassum* spp. biomass was obtained from the Nha Trang coastal area, Vietnam, in sun-dried, bagged form. The procurement year, supplier specification, and species-level voucher information were unavailable. Accordingly, the raw material was reported at genus level as commercial *Sargassum*

spp. biomass. Other formulation ingredients included dried tuna flakes, dried shrimp fragments, commercial *Porphyra/Pyropia*-type dried red seaweed, roasted sesame, mung bean, carrot, sugar, and sodium chloride.

**Preparing and fermenting *Sargassum*-based biomass.** Dried biomass was rehydrated in water for 6 h, washed, pretreated in 1.5% sodium bicarbonate solution at 90–100°C for 2 h, and washed again before being reduced to 1–2-mm fragments for fermentation. We did not record the liquid-to-solid ratio during rehydration and the total wash-water volume.

The experiment included mixed lactic starter containing *Companilactobacillus farciminis* (formerly *Lactobacillus farciminis*) and *Lactiplantibacillus pentosus* (formerly *L. pentosus*). The current genus names follow the taxonomy specified in [7]. The culture was selected as a food-compatible starter for acidification rather than through a strain-screening experiment. No source and lot information for the starter and principal reagents was available.

The fermentation was conducted with 2.15% starter culture and 5.0% sugar at 30°C for 86 h. These parameters served as fixed operating set points rather than optimization ranges. The fermented biomass was then pressed to remove liquid. Supplementary Table S1 summarizes the processing and drying conditions. Figure 1 shows the overall workflow.

**Comparing drying methods.** The pressed fermented biomass was dried by one of three routes: hot-air drying at  $60 \pm 2^\circ\text{C}$  for 10 h with a material thickness of 2–3 cm; low-temperature drying at  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  for 36 h with a similar thickness; freeze drying at  $-50 \pm 2^\circ\text{C}$  for 40 h. The drying-equipment identity and detailed freeze-dryer pressure and temperature profiles were not recorded. After drying, the biomass was size-reduced and sifted through a 2-mm sieve.

The drying routes were compared using moisture content and handling attributes (color, texture, aroma, looseness, and clumping). These attributes were chosen to identify a dry ingredient suitable for uniform dispersion in a particulate seasoning. Although drying can alter seaweed structure and composition, nutrient and volatile retention were not measured [8–10]. The selection therefore reflects handling performance rather than superior nutrient or aroma preservation.

**Formulation design and mix optimization.** The formulation was developed in Statgraphics XV using a constrained mix design. The seven variable ingredients included fermented seaweed biomass ( $X_1$ ), *Porphyra/Pyropia*-type dried red seaweed ( $X_2$ ), dried tuna ( $X_3$ ), dried shrimp ( $X_4$ ), roasted sesame ( $X_5$ ), mung beans ( $X_6$ ), and carrots ( $X_7$ ). Sugar and sodium chloride were fixed at 3% and 2%, respectively; the seven variable ingredients accounted for the remaining 95%.

The working ranges were 30–35% fermented seaweed biomass, 10–15% red seaweed, 10–15% dried tuna, 5–10% dried shrimp, 20–25% roasted sesame, 10–15%

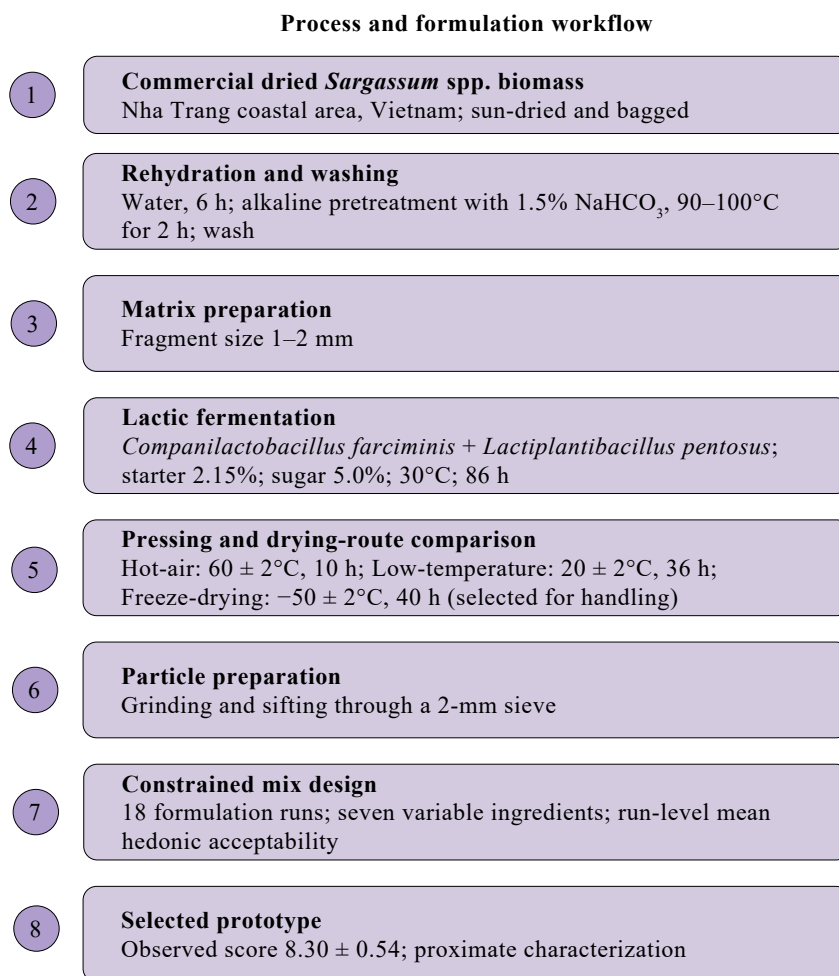


Figure 1. Process workflow for preparing fermented *Sargassum*-based biomass and developing a seafood rice-seasoning prototype, including the fixed fermentation conditions

Рисунок 1. Технология подготовки ферментированной биомассы бурых морских водорослей (*Sargassum* spp.) и разработки рецептуры приправы для риса (с фиксированными условиями ферментации)

mung beans, and 5–10% carrots. The overall hedonic acceptability was the response variable. The 18 runs comprised 15 unique ingredient combinations because three formulations were repeated in the analyzed design matrix. The pseudo-components were calculated as  $Z_i = (X_i - \text{lower bound})/5$  for each 5-percentage-point working range. Supplementary Table S3 provides the complete matrix and pseudo-components. The approach followed established mix experiment principles [11–12] and their application to food formulation [13].

A first-order linear mix model was fitted to the run-level mean scores. The model fit was assessed using analysis of variance (ANOVA),  $R^2$ , adjusted  $R^2$ , predicted values, and residual diagnostics. The standardized-residual plot included a zero line and descriptive reference lines at  $\pm 2$ , which were neither confidence intervals nor a formal outlier test. Because assessor-level observations were unavailable, the the diagnostics apply to formulation-run means rather than assessor-level variation.

**Sensory acceptability test.** Thirty assessors familiar with rice-seasoning products evaluated the samples on a nine-point hedonic scale ranging from 1 (“dislike extremely”) to 9 (“like extremely”). The assessors were informed that the samples contained seaweed, seafood ingredients, sesame, and mung beans. The mean overall acceptability score for each formulation run was used in the mix model. Because assessor-level raw scores were unavailable, the sensory analysis was limited to preliminary formulation-level acceptability and was not interpreted as a representative consumer study [14, 15].

**Proximate composition analyses.** The contents of moisture, proteins, total ash, and lipids were reported on an as-received basis unless stated otherwise. Sampling followed Vietnamese National Standard TCVN 5276:1990. The contents of proteins, moisture, ash, and lipids were determined according to Vietnamese National Standards TCVN 3705:1990, TCVN 8135:2009, TCVN 5105:2009, and TCVN 3703:2009, respectively.

**Ethics statement.** Participation in the preliminary sensory acceptability evaluation was voluntary. The assessors were informed about the product and its potentially allergenic ingredients, including seafood, sesame, and mung beans, and provided informed consent before evaluation. The study involved no clinical intervention, biological sampling, or collection of sensitive personal data.

**Statistical analysis.** The data are presented as mean  $\pm$  standard deviation where available. The mix modeling and analysis of variance relied on Statgraphics XV, with descriptive calculations in Microsoft Excel. The analytical results were treated as replicated measurements only when replicate data were available. The sensory model diagnostics were based on run-level mean scores and therefore did not quantify assessor-level variability.

## Results and discussion

**Fermented biomass profile.** The fermented biomass was brown to dark brown and soft, with a characteristic fermented-seaweed aroma, no overpowering fishy note, and a neutral to slightly sour taste. Its pH was  $4.56 \pm 0.05$ , the moisture level was  $78.54 \pm 0.12\%$ , and the protein content was  $1.04 \pm 0.11\%$ . The pH was consistent with acidification under the tested conditions. Because matched pre-fermentation chemical and volatile measurements were not available, these endpoint values cannot quantify fermentation-induced changes in composition or aroma. Recent reviews likewise show that the effects of seaweed fermentation depend strongly on substrate and process conditions [4, 5].

The higher protein percentage after freeze drying is best interpreted in relation to water removal and the as-received reporting basis rather than protein synthesis or selective nutrient enrichment. A nutrient-retention comparison would require matched initial and final dry-matter measurements, material balances, and route-specific replicate analyses. Fermentation and drying is the process steps rather than evidence of compositional enhancement.

**Selecting the drying route.** The hot-air drying yielded a dark brown to nearly black, hard, nonporous,

clumped material, whereas the low-temperature drying yielded a dark-brown material that remained tough and clumped. For these two routes, the study records provided only a combined moisture range of 4.5–4.6%, without route-specific replicate values. The freeze drying yielded a brown to dark brown, crisp, loose, non-clumped material with  $4.51 \pm 0.20\%$  moisture and  $5.16 \pm 0.16\%$  protein. It was selected because its handling properties matched the intended particulate seasoning format (Table 1).

The comparison addressed technological handling rather than composition. Published studies show that seaweed drying routes involve trade-offs among moisture removal, structure, processing intensity, and component retention [8–10]. The present results support freeze drying for looseness and ease of mixing; comparative retention of protein, lipid, and volatile compounds was not measured.

Freeze drying also has practical disadvantages, including a longer processing cycle, as well as greater equipment and energy demands than conventional hot-air drying. Its selection here is therefore a prototype-stage handling decision rather than an economic or industrial optimum. To ensure successful scale-up, a comparison of flowability, particle-size distribution, water activity, energy demand, and sensory quality should be conducted under optimized hot-air, hybrid, or low-temperature drying conditions.

**Mix model and diagnostics.** The overall acceptability scores ranged from 6.1 to 8.3 across the 18 formulation runs. The first-order mix model was significant ( $F = 45.40$ ,  $p < 0.001$ ), with  $R^2 = 96.12\%$  and adjusted  $R^2 = 94.00\%$ . In terms of the pseudo-components, the fitted equation was as follows:

$$Y = 6.26Z_1 + 6.86Z_2 + 8.08Z_3 + 6.47Z_4 + 8.43Z_5 + 6.95Z_6 + 6.15Z_7$$

where  $Y$  was overall acceptability and  $Z_1$ – $Z_7$  were the constrained pseudo-components. The coefficients shown

Table 1. Drying-route comparison for fermented *Sargassum*-based biomass

Таблица 1. Сравнительный анализ способов сушки ферментированной биомассы морских водорослей (*Sargassum* spp.)

| Drying route           | Processing condition                                            | Moisture result                   | Handling attributes                                  | Decision     |
|------------------------|-----------------------------------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------------------------|--------------|
| Hot-air drying         | $60 \pm 2^\circ\text{C}$ , 10 h; thickness approximately 2–3 cm | Recorded overall range: 4.5–4.6%* | Dark brown to nearly black; hard, nonporous, clumped | Not selected |
| Low-temperature drying | $20 \pm 2^\circ\text{C}$ , 36 h; similar thickness              | Recorded overall range: 4.5–4.6%* | Dark brown; seaweed odor; tough, clumped             | Not selected |
| Freeze drying          | $-50 \pm 2^\circ\text{C}$ , 40 h                                | $4.51 \pm 0.20\%$                 | Brown to dark brown; crisp, loose, non-clumped       | Selected     |

Note: \* – for hot-air and low-temperature drying, the study records provided only an overall moisture range of 4.5–4.6%; route-specific replicate values were unavailable.

Примечание: \* – для образцов, полученных методом конвективной и низкотемпературной сушки, имеются данные только об общем диапазоне влажности (4,5–4,6 %); отсутствуют данные параллельных определений для каждого конкретного метода.

are rounded (see Supplementary Table S3 for model-generated predicted values). The positive coefficients should not be interpreted as independent additive effects outside the constrained mix domain. Within the tested domain, roasted sesame and dried tuna had the largest fitted coefficients whereas formulations at the upper tested bounds for carrot, shrimp, or fermented biomass had lower run-level scores.

The predicted-versus-observed plot showed close agreement across the analyzed run matrix (Fig. 2a). Run 2 was the only point above the +2 descriptive reference line (standardized residual = 2.3006), and no run was below -2. This fact was treated as a diagnostic flag rather than a formal outlier because the  $\pm 2$  lines served as descriptive references, not confidence limits, and assessor-level data were unavailable (Fig. 2b).

The high  $R^2$  should be viewed in the context of the small, constrained design and the use of run-level mean responses. It describes the model fit within the tested

domain but does not establish predictive performance for new ingredient ranges, independent production batches, or broader consumer populations. Independent confirmation with assessor-level data would enable mixed-effects or repeated-measures analysis and a more informative assessment of prediction uncertainty.

**Selected formulation and confirmation.** The selected formulation contained 30% fermented seaweed biomass, 10% *Porphyra/Pyropia*-type dried red seaweed, 10% dried tuna, 5% dried shrimp, 25% roasted sesame, 10% mung bean, 5% carrot, 3% sugar, and 2% sodium chloride (Table 2). The model predicted a score of 8.43, whereas the observed score was  $8.30 \pm 0.54$ , a difference of 0.13 scale units.

The seven variable ingredients accounted for 95% of the formulation, while sugar and sodium chloride accounted for the remaining 5%. Because the selected formulation was already one of the 18 analyzed runs, its observed score constitutes a within-design confirmation

Table 2. Mix variables, working ranges, and selected formulation

Таблица 2. Переменные компоненты в составе смеси, рабочие диапазоны и отобранная рецептура

| Variable | Ingredient                                      | Working range, % | Selected formulation, % |
|----------|-------------------------------------------------|------------------|-------------------------|
| $X_1$    | Fermented <i>Sargassum</i> -based biomass       | 30–35            | 30                      |
| $X_2$    | <i>Porphyra/Pyropia</i> -type dried red seaweed | 10–15            | 10                      |
| $X_3$    | Dried tuna                                      | 10–15            | 10                      |
| $X_4$    | Dried shrimp                                    | 5–10             | 5                       |
| $X_5$    | Roasted sesame                                  | 20–25            | 25                      |
| $X_6$    | Mung beans                                      | 10–15            | 10                      |
| $X_7$    | Carrots                                         | 5–10             | 5                       |
| Fixed    | Sugar                                           | 3                | 3                       |
| Fixed    | Sodium chloride                                 | 2                | 2                       |

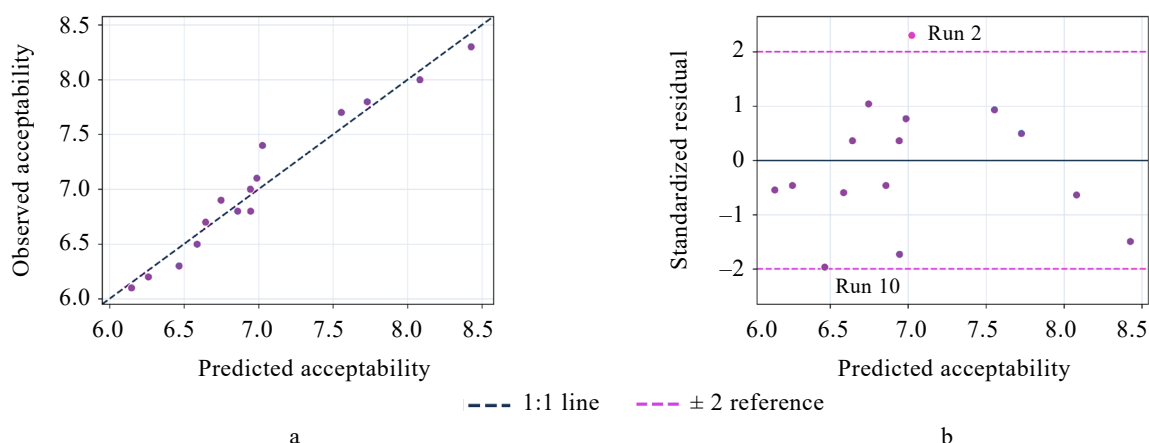


Figure 2. Model diagnostics for the 18-run formulation matrix: a – predicted versus observed run-level mean acceptability with a 1:1 line; b – standardized residuals versus predicted values with zero and  $\pm 2$  descriptive reference lines (these lines are neither confidence intervals nor a formal outlier test)

Рисунок 2. Диагностическая оценка модели для 18-точечной рецептурной матрицы: а – прогнозируемые средние значения потребительской приемлемости и экспериментальные (наблюдаемые) (линия 1:1); б – стандартизированные остатки и прогнозируемые значения (с указанием опорных линий, нулевой и  $\pm 2$ ). Данные линии носят описательный характер и не являются ни доверительными интервалами, ни формальным критерием для выявления аномальных значений



Table 3. Mix model and selected formulation summary

Таблица 3. Модель компонентного состава смеси и отобранная рецептура: сводная информация

| Item                                                   | Reported value                                                                                                        |
|--------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Formulation runs                                       | 18 runs; 15 unique formulations; repeated formulations at runs 4/17, 12/16, and 13/18                                 |
| Response                                               | Run-level mean overall hedonic score (nine-point scale)                                                               |
| Model                                                  | First-order linear constrained mix model using pseudo-components                                                      |
| <i>F</i> -ratio; <i>p</i> -value                       | 45.40; <i>p</i> < 0.001                                                                                               |
| <i>R</i> <sup>2</sup> ; adjusted <i>R</i> <sup>2</sup> | 96.12%; 94.00%                                                                                                        |
| Fitted equation                                        | $Y = 6.26Z_1 + 6.86Z_2 + 8.08Z_3 + 6.47Z_4 + 8.43Z_5 + 6.95Z_6 + 6.15Z_7$                                             |
| Predicted score                                        | 8.43                                                                                                                  |
| Observed score                                         | 8.30 ± 0.54                                                                                                           |
| Diagnostics                                            | Run-level predicted values, residuals, and standardized residuals are reported in Supplementary Table S3 and Figure 2 |

Table 4. Process and product-composition values

Таблица 4. Обработка и компонентный состав продукта

| Sample or product stage        | Parameter | Reported value* | Interpretation                                                        |
|--------------------------------|-----------|-----------------|-----------------------------------------------------------------------|
| Fermented biomass              | pH        | 4.56 ± 0.05     | Acidification endpoint                                                |
| Fermented biomass              | Moisture  | 78.54 ± 0.12%   | Fermented biomass characterization                                    |
| Fermented biomass              | Proteins  | 1.04 ± 0.11%    | Fermented biomass characterization; not a before vs. after comparison |
| Freeze-dried fermented biomass | Moisture  | 4.51 ± 0.20%    | Drying endpoint                                                       |
| Freeze-dried fermented biomass | Proteins  | 5.16 ± 0.16%    | Dried biomass characterization                                        |
| Selected seasoning             | Moisture  | 4.64 ± 0.30%    | Prototype characterization                                            |
| Selected seasoning             | Proteins  | 28.50 ± 1.58%   | Proximate composition                                                 |
| Selected seasoning             | Total ash | 15.30 ± 0.32%   | Proximate composition                                                 |
| Selected seasoning             | Lipids    | 15.00 ± 0.64%   | Proximate composition                                                 |

Note: \* – as-received basis unless stated otherwise.

Примечание: \* – в пересчете на исходную массу, если не указано иное.

rather than an independent validation (Table 3). The close predicted versus observed agreement supports the model-guided selection within the tested bounds but does not justify extrapolation beyond those bounds or to broader consumer populations.

The mix design was appropriate because changing the proportion of one ingredient necessarily altered the proportions of the others. The model therefore represents balance within the constrained seven-component system rather than isolated causal effects of individual ingredients, consistent with the mix design theory [11–13].

The selected formulation was at the lower bounds of six variable ingredients and the upper bound of roasted sesame. For a first-order linear mix model, a boundary optimum identifies the most favorable region within the specified domain rather than a universal optimum. Further work should explore the sesame–tuna–seaweed region around this boundary in independent production batches and test whether a quadratic Scheffé model captures a curvature that the present first-order model cannot represent.

**Prototype composition, practical implications, and limitations.** The selected product contained  $4.64 \pm 0.30\%$

moisture,  $28.50 \pm 1.58\%$  protein,  $15.30 \pm 0.32\%$  total ash, and  $15.00 \pm 0.64\%$  lipid on an as-received basis (Table 4). These values describe the tested prototype but do not demonstrate its nutritional superiority. Total ash reflects contributions from the marine ingredients, sesame, and added sodium chloride; the complete mineral and sodium profile was not determined. The lipid content contributes to flavor and mouthfeel but also increases the importance of oxidative stability and packaging performance during further production stages.

The study provides a defined starting formulation and process conditions for further product development. Before scale-up, independent production batches should be used to confirm the formulation and to evaluate mixing uniformity, particle segregation, water activity, microbiological quality, lipid oxidation, packaging-barrier performance, and sensory stability. Potential seaweed-associated hazards, including heavy metals, iodine, and arsenic speciation, should also be assessed because commercial *Sargassum* biomass can vary with origin and species composition [2, 3].

The particulate formulation also raises physical quality issues that were not captured by the sensory model.

Differences in particle size, density, and surface oil can promote segregation during blending, filling, transport, and storage, causing portions from the same package to differ from the laboratory blend. A prospective scale-up should therefore define mixing sequence and time, sieve fractions, target bulk density, and a sampling plan for blend uniformity. This is especially relevant because low-density dried seaweeds are combined with denser seafood and seed particles.

This research did not measure carbohydrate, dietary fiber, fatty-acid composition, nutrient retention across the drying routes, volatile compounds, and paired chemical measurements before and after fermentation. The 30-person panel supported only preliminary formulation-level acceptability, and the selected formulation was not evaluated in an independent validation batch. The current data therefore identify a promising formulation region while leaving storage stability, comprehensive safety, nutrient retention, and market-level consumer acceptance for subsequent studies.

### Conclusion

Commercial *Sargassum* spp. biomass underwent a six-hour rehydration, 1.5% sodium bicarbonate pretreatment at 90–100°C for 2 h, and lactic fermentation with 2.15% starter culture and 5.0% sugar at 30°C for 86 h. The freeze drying yielded a crisp, loose, non-clumped biomass with  $4.51 \pm 0.20\%$  moisture and was selected on the basis of handling properties. The drying comparison assessed neither nutrient nor volatile retention. The significant mix model ( $F = 45.40$ ,  $p < 0.001$ ,  $R^2 = 96.12\%$ ) identified a boundary formulation with an observed acceptability score of  $8.30 \pm 0.54$ , close to the predicted value of 8.43. The final product contained  $4.64 \pm 0.30\%$  moisture,  $28.50 \pm 1.58\%$  protein,  $15.30 \pm 0.32\%$  total ash, and  $15.00 \pm 0.64\%$  lipid. Together, these results support prototype feasibility within the tested process and formulation domain. Scale-up or market-level claims require independent production batches, broader consumer testing, storage studies, and comprehensive safety assessment.

### 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.

### Acknowledgments

The authors thank the Ministry of Agriculture and Environment, Vietnam, for support during the study.

### Supplementary information

The supplementary material contains Table S1 (processing and drying conditions), Table S2 (mixture-model summary), and Table S3 (18-run formulation matrix, pseudo-components, predicted values, residuals, and standardized-residual diagnostics). The supplementary material can be found online at <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-3-2660>

### Data availability

The formulation matrix and run-level model-diagnostic data are provided in Supplementary Table S3. Assessor-level raw sensory data were unavailable.

### Критерии авторства

Все авторы внесли равный вклад в исследование и несут равную ответственность за информацию, опубликованную в этой статье.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов в связи с публикацией данной статьи.

### Благодарности

Авторы выражают благодарность Министерству сельского хозяйства и окружающей среды Вьетнама за поддержку в проведении данного исследования.

### Дополнительные материалы

Дополнительные материалы содержатся в Таблице S1 (условия обработки и сушки), Таблице S2 (сводная модель компонентного состава) и Таблице S3 (матрица рецептуры по результатам 18 экспериментов, псевдокомпоненты, прогнозируемые значения, остатки и диагностика стандартизированных остатков). Дополнительные материалы доступны онлайн по адресу: <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-3-2660>

### Доступность данных

Матрица рецептуры и данные диагностики модели на уровне экспериментов представлены в Таблице S3 (см. Дополнительные материалы). Исходные данные гедонистической оценки на уровне отдельных дегустаторов отсутствуют.

### References / Список литературы

1. Siripongvutikorn S, Banphot P, Rampoei N, Thantrirat J. Quality of Thai Furikake dried seasoning powder fortified with natural calcium and phosphorus. *Italian Journal of Food Science*. 2023;35(4):88–101. <https://doi.org/10.15586/ijfs.v35i4.2411>
2. Zhang L, Liao W, Huang Y, Wen Y, Chu Y, *et al.* Global seaweed farming and processing in the past 20 years. *Food Production, Processing and Nutrition*. 2022;4:23. <https://doi.org/10.1186/s43014-022-00103-2>

3. Rogel-Castillo C, Latorre-Castañeda M, Muñoz-Muñoz C, Agurto-Muñoz C. Seaweeds in food: Current trends. *Plants*. 2023;12(12):2287. <https://doi.org/10.3390/plants12122287>
4. Reboleira J, Silva S, Chatzifragkou A, Niranjana K, Lemos MFL. Seaweed fermentation within the fields of food and natural products. *Trends in Food Science & Technology*. 2021;116:1056–1073. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.08.018>
5. Babich O, Ivanova S, Michaud P, Budenkova E, Kashirskikh E, et al. Fermentation of micro- and macroalgae as a way to produce value-added products. *Biotechnology Reports*. 2024;41:e00827. <https://doi.org/10.1016/j.btre.2023.e00827>
6. Brandao M, Marques DJ, Sousa S, Mateus M, Pinheiro HM, et al. Lactic acid bacteria and yeast fermentation to improve the nutritional value of *Ulva rigida*. *Marine Drugs*. 2025;23(3):106. <https://doi.org/10.3390/md23030106>
7. Zheng J, Wittouck S, Salvetti E, Franz CMAP, Harris HMB, et al. A taxonomic note on the genus *Lactobacillus*: Description of 23 novel genera, emended description of the genus *Lactobacillus* Beijerinck 1901, and union of *Lactobacillaceae* and *Leuconostocaceae*. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*. 2020;70(4), 2782–2858. <https://doi.org/10.1099/ijsem.0.004107>
8. Sappati PK, Nayak B, VanWalsum GP, Mulrey OT. Combined effects of seasonal variation and drying methods on the physicochemical properties and antioxidant activity of sugar kelp (*Saccharina latissima*). *Journal of Applied Phycology*. 2019;31:1311–1332. <https://doi.org/10.1007/s10811-018-1596-x>
9. Santhoshkumar P, Yoha KS, Moses JA. Drying of seaweed: Approaches, challenges and research needs. *Trends in Food Science & Technology*. 2023;138:153–163. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2023.06.008>
10. Ashworth H, Donohoe P, Kibblewhite B. Seaweed and the applicability of freeze drying techniques. *Frontiers in Marine Science*. 2024;11:1386418. <https://doi.org/10.3389/fmars.2024.1386418>
11. Scheffe H. Experiments with mixtures. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B*. 1958;20(2):344–360. <https://doi.org/10.1111/j.2517-6161.1958.tb00299.x>
12. Cornell JA. Experiments with mixtures: Designs, models, and the analysis of mixture data. 3<sup>rd</sup> edition. New York: John Wiley & Sons; 2002. 680 p. <https://doi.org/10.1002/9781118204221>
13. Dogruer I, Baser F, Gulec S, Tokatli F, Ozen B. Formulation of gluten-free cookies utilizing chickpea, carob, and hazelnut flours through mixture design. *Foods*. 2023;12(19):3689. <https://doi.org/10.3390/foods12193689>
14. Lawless HT, Heymann H. Sensory evaluation of food: Principles and practices. New York: Springer; 2010. 596 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-6488-5>
15. Ruiz-Capillas C, Herrero AM, Pintado T, Delgado-Pando G. Sensory analysis and consumer research in new meat products development. *Foods*. 2021;10(2):29. <https://doi.org/10.3390/foods10020429>

#### Additional information about the authors / Дополнительная информация об авторах

Bui Thi Thu Hien / Буй Тхи Тху Хиен ORCID 0000-0002-8146-758X  
Pham Thi Diem / Фам Тхи Дием ORCID 0000-0003-0130-077X  
Dang Van An / Данг Ван Ан ORCID 0000-0003-2925-2749  
Pham Thi Duyen / Фам Тхи Зуен  
Nguyen Van Nguyen / Нгуен Ван Нгуен  
Nguyen Khac Bat / Нгуен Кхак Бат ORCID 0000-0003-2596-1994

<https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-3-2654>  
<https://elibrary.ru/EWZRSM>

Обзорная статья  
<https://fppt.ru>

## Молекулярные механизмы микробной биоминерализации: роль белковых молекул



Е. Е. Бородина<sup>1</sup>, Д. Е. Колпакова<sup>1,\*</sup>, А. В. Гордиенко<sup>2</sup>,  
И. И. Плешивцев<sup>1</sup>, К. В. Карчин<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Кемеровский государственный университет , Кемерово, Россия

<sup>2</sup> ООО «Азот-Агро», Кемерово, Россия

Поступила в редакцию: 01.06.2026

Принята после рецензирования: 17.07.2026

Принята к публикации: 01.09.2026

\*e-mail: kolpakova1205@mail.ru

© Е. Е. Бородина, Д. Е. Колпакова, А. В. Гордиенко,

И. И. Плешивцев, К. В. Карчин, 2026



### Аннотация.

Микробная биоминерализация представляет собой универсальный природный процесс образования и накопления неорганических минералов, играющий ключевую роль в биогеохимических циклах и в формировании биологических структур. Несмотря на значительный прогресс в изучении данного явления, молекулярные механизмы, опосредованные белковыми молекулами и внеклеточными полимерами, остаются недостаточно систематизированными. Цель исследования – обобщить и систематизировать имеющиеся данные о молекулярных механизмах микробной биоминерализации с акцентом на роль белковых молекул в нуклеации, росте и стабилизации минеральных фаз.

Объекты исследования – научные публикации (2000–2026 гг.) по молекулярным механизмам микробной биоминерализации, включая роль белков и внеклеточных полимеров в нуклеации и росте минеральных фаз. Источники отбирали в базах Scopus, ScienceDirect, Google Scholar, MDPI и PubMed с предпочтением работ последних 5–10 лет.

Установлено, что биоминерализация реализуется через внутриклеточные и внеклеточные механизмы. У магнитотактических бактерий внутриклеточное образование магнетита происходит в магнитосомах и включает формирование магнитосомной мембраны, поглощение железа, его транспорт в везикулу и кристаллизацию  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ . В этих процессах участвуют белки MamB, MamM, MamN и MamZ, связанные с транспортом железа; MamP, MamT, MamX и MamE, регулирующие окислительно-восстановительные реакции, а также MamC, MamD, MamF, MamG, Mmsb и MmsF, контролирующие размер и морфологию кристаллов. При внеклеточной биоминерализации клеточные поверхности и внеклеточные полимерные вещества служат центрами зарождения минералов, а кислые белки, карбоангидразы, флавопротеины и цитохромы с-типа участвуют в осаждении карбонатов, переносе электронов и восстановлении металлов.

Белковые молекулы рассматриваются как ключевые регуляторы микробной биоминерализации. Они обеспечивают транспорт ионов железа и кальция, поддержание pH, перенос электронов, восстановление металлов, зарождение кристаллов и контроль их формы, размера и полиморфной модификации. Описанные механизмы находят применение в разработке биомедицинских наноматериалов, биосенсоров, технологий очистки сточных вод и восстановления минеральных строительных материалов.

**Ключевые слова.** Биоминерализация, магнитосомы, магнетит, белки, биоминералы, микроорганизмы, магнитотактические бактерии, цианобактерии, грибы, дрожжи, микроводоросли

**Финансирование.** Работа выполнена в рамках государственного задания по теме «Исследование потенциала ростостимулирующих бактерий для повышения агрономической биофортификации пшеницы» (шифр FZSR-2024-0009).

**Для цитирования:** Бородина Е. Е., Колпакова Д. Е., Гордиенко А. В., Плешивцев И. И., Карчин К. В. Молекулярные механизмы микробной биоминерализации: роль белковых молекул. Техника и технология пищевых производств. 2026. Т. 56. № 3. С. 565–583. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-3-2654>



## Molecular Mechanisms of Microbial Biomineralization: Protein Molecules



Ekaterina E. Borodina<sup>1</sup>, Daria E. Kolpakova<sup>1,\*</sup>,  
Andrey V. Gordiyenko<sup>2</sup>, Ivan I. Pleshivtsev<sup>1</sup>,  
Konstantin V. Karchin<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Kemerovo State University , Kemerovo, Russia

<sup>2</sup> Azot-Agro Ltd, Kemerovo, Russia

Received: 01.06.2026

Revised: 17.07.2026

Accepted: 01.09.2026

\*e-mail: [kolpakova1205@mail.ru](mailto:kolpakova1205@mail.ru)

© E.E. Borodina, D.E. Kolpakova, A.V. Gordiyenko, I.I. Pleshivtsev,  
K.V. Karchin, 2026



### Abstract.

Microbial biomineralization is a ubiquitous natural process involving the formation and accumulation of inorganic minerals. It plays a crucial role in biogeochemical cycles and the development of biological structures. Despite recent progress in studying this phenomenon, the underlying molecular mechanisms mediated by proteins and extracellular polymers remain insufficiently systematized. This study reviews and synthesizes existing data on the molecular mechanisms of microbial biomineralization, with an emphasis on the role of proteins in the nucleation, growth, and stabilization of mineral phases.

The research material comprises peer-reviewed publications indexed in Scopus, ScienceDirect, Google Scholar, MDPI, and PubMed from 2000 to 2026. The literature search focused on the molecular mechanisms of microbial biomineralization, including the effects of proteins and extracellular polymers on mineral phase nucleation and growth.

Biomineralization occurs via both intracellular and extracellular pathways. In magnetotactic bacteria, intracellular magnetite formation takes place within magnetosomes; this process encompasses magnetosomal membrane development, iron uptake, intra-vesicular transport, and Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> crystallization. These processes involve specific proteins: MamB, MamM, MamH, and MamZ are responsible for iron transport; MamP, MamT, MamX, and MamE regulate redox reactions; while MamC, MamD, MamF, MamG, Mms6, and MmsF control crystal size and morphology. During extracellular biomineralization, cell surfaces and extracellular polymeric substances serve as mineral nucleation sites, whereas acidic proteins, carbonic anhydrases, flavoproteins, and c-type cytochromes participate in carbonate precipitation, electron transfer, and metal reduction.

Proteins serve as key regulators of microbial biomineralization by driving ion transport (iron and calcium), pH maintenance, electron transfer, metal reduction, and crystal nucleation, while also controlling crystal shape, size, and polymorphism. These mechanisms find practical application in biomedical nanomaterials, biosensors, wastewater treatment, and the restoration of mineral-based building materials.

**Keywords.** Biomineralization, magnetosomes, magnetite, proteins, biominerals, microorganisms, magnetotactic bacteria, cyanobacteria, fungi, yeasts, microalgae

**Funding.** The work was carried out within the framework of the state task on the topic «Research of the potential of growth-stimulating bacteria to increase the agronomic biofortification of wheat» (code FZSR-2024-0009).

**For citation:** Borodina EE, Kolpakova DE, Gordiyenko AV, Pleshivtsev II, Karchin KV. Molecular Mechanisms of Microbial Biomineralization: Protein Molecules. Food Processing: Techniques and Technology. 2026;56(3):565–583. (In Russ.) <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-3-2654>

### Введение

Металлы представляют собой важные компоненты для функционирования биологических систем, участвуя в биохимических процессах, которые необходимы для жизнедеятельности микроорганизмов [1, 2]. В настоящем обзоре основное внимание уделяется биоминерализации – процессу, посредством которого микроорганизмы генерируют и накапливают отложения неорганических минералов как внутри своих

клеток, так и во внеклеточной среде. Микробная биоминерализация – повсеместный природный процесс, охватывающий образование и накопление различных минералов – фосфатов, карбонатов, силикатов, сульфатов и соединения железа. В последние годы достигнут значительный прогресс в изучении роли различных видов микроорганизмов в биоминерализации, включая бактерии, цианобактерии, дрожжи, грибы и др. Бактерии играют важную роль в кальцификации,

а также в минерализации железа [3–5]. Цианобактерии, относящиеся к примитивным автотрофным нитевидным формам, являются основными агентами силицирования – процесса биоминерализации кремнезема. Штамм *Synechococcus* sp. демонстрирует значительный потенциал к бактериальному силицированию (осаждению аморфного кремнезема в перенасыщенных растворах кремниевой кислоты) при экстремальных значениях pH. Следует отметить, что *Synechococcus* spp. также участвуют в осаждении кальцита в щелочных условиях pH в присутствии ионов кальция [6, 7]. Грибы в основном участвуют в отложении органических кислот и комплексов металлов, например оксалатов металлов, фосфатов урана и др. [8]. Дрожжи также имеют ключевое значение в формировании сложных наночастиц, таких как теллурид кадмия, трикальций-фосфат и др., используя их в качестве биоматриц [9]. Различные виды микроводорослей – диатомовые водоросли, кокколитофориды и морские простейшие – могут способствовать биокальцификации и биосилицированию [10]. Каждая группа микроорганизмов использует собственный биохимический механизм для активного участия в биогеохимическом цикле и осаждении биоминералов в естественной и искусственной среде [11]. Цель исследования – обобщить и систематизировать имеющиеся данные о молекулярных механизмах микробной биоминерализации с акцентом на роль белковых молекул в этом процессе.

#### Объекты и методы исследования

Объектами исследования послужили научные публикации (2000–2026 гг.), отобранные по тематическому принципу, включая фундаментальные работы, заложившие теоретические основы направления, и современные исследования молекулярных механизмов минерализации, а также данные о роли белков, ферментов и внеклеточных полимерных веществ в нуклеации и росте минеральных фаз, отобранные из электронных библиотек Scopus, ScienceDirect, Google Scholar, MDPI и PubMed с приоритетом публикаций последних 5–10 лет.

#### Результаты и их обсуждение

**Основные механизмы микробиологической биоминерализации.** Микробиологическая биоминерализация – процесс образования и отложения микроорганизмами неорганических минералов, реализуемый двумя основными путями:

1. Биологически контролируемая биоминерализация характеризуется строго контролируемым процессом, который локализован в органеллах, либо на поверхности клетки. В этом случае клетки регулируют образование минерала, тем самым определяя его химический состав, морфологическую структуру, а также размер частиц.

2. Биологически индуцированная биоминерализация предполагает минимальный контроль над про-

цессом минерализации. Клетки напрямую не регулируют местоположение и механизм отложения минералов [12, 13].

Помимо этого, биоминерализацию подразделяют на внутриклеточную и внеклеточную. Биологически индуцированная биоминерализация обычно является результатом внеклеточной минерализации, которая возникает в результате пассивных клеточных механизмов. В этом случае минералы осаждаются на поверхности клеток, которые служат гетерогенными центрами зарождения. Отсутствие клеточного контроля приводит к образованию частиц с варьирующими размерами и неправильной морфологией [14]. Внутриклеточная биоминерализация, напротив, характеризуется высокой степенью регуляции и происходит в специализированных органеллах. Минерал формируется внутри клетки и впоследствии может транспортироваться на ее поверхность [15]. В данном процессе задействованы органеллы, содержащие белковые системы – переносчики ионов, ионные насосы и каналы, – которые регулируют поглощение ионов и их пассивную диффузию через биологические барьеры [16].

Магнитотактические бактерии являются примером микроорганизмов, осуществляющих внутриклеточную биоминерализацию. Они используют биологически контролируемый путь для образования магнитных биоминералов [17, 18]. Содержание железа в клетках магнитотактических бактерий колеблется от 3 у большинства бактерий до 10 % от сухого веса у *Magnetobacterium bavaricum*. Ионы железа поглощаются не в форме Fe(II), а в виде Fe(III), который образуется путем быстрого окисления из Fe(II) [19].

Механизм биологически контролируемой биоминерализации у данных микроорганизмов включает последовательность стадий, протекающих внутри магнитосом – специализированных фосфолипидных везикул, в которых осуществляется формирование видоспецифичных кристаллов магнетита: образование магнитосом; внутриклеточное поглощение железа; транспортировка железа в магнитосому; регулируемая минерализация кристаллов внутри магнитосомы [20].

Анализ генома магнитотактических бактерий выявил кластер оперонов, известный как «остров магнитосом», который участвует в процессе биоминерализации [21]. Эти опероны, включая *tamAB*, *tamXY*, *tamGFDC* и *tamS6*, контролируют формирование магнитосом и их выравнивание в стабильные наноструктуры. Современная модель формирования магнитосом представляет собой четырехэтапный процесс [22]. На первом этапе происходит инвагинация мембраны и формирование магнитосомного пузырька. Этот процесс контролируется различными белками, в частности MamB, MamI, MamL, MamQ и MamY. Данный этап предусматривает сортировку и локализацию белков биоминерализации внутри и на мембране магнитосом. На следующем этапе магнитосомы образуют цепочки, а их мембраны связываются с нитями MamK

посредством белка-линкера MamJ для создания более сильного дипольного момента, чем у монокристалла. Третий этап охватывает транспорт железа, окислительно-восстановительные реакции и образование зародышей [23].

Ключевым вопросом в механизме биоминерализации магнетита выступает восстановление Fe(III) до Fe(II) в момент переноса через клеточные мембраны (наружную, цитоплазматическую и магнитосомную) перед попаданием в везикулы магнитосом. Ферриредуктаза, аналогичная той, что обнаружена у других микроорганизмов, у магнитотактических бактерий пока не выявлена. Однако у *Magnetospirillum magnetotacticum* выявлена растворимая цитоплазматическая ферриредуктаза (цитохром cd1) [24]. Данный фермент может восстанавливать поглощенное Fe(III) до Fe(II) для транспортировки в везикулы или, напротив, окислять Fe(II) до Fe(III) для обратного переноса Fe(II) в периплазму.

Железо поступает в магнитосомы, предположительно, при участии белков, подобных ферритину. Внутри везикул образуется ферригидрит ( $\text{Fe}_2\text{O}_3 \times n\text{H}_2\text{O}$ ), который затем вступает в реакцию с Fe(II) с образованием кристаллических зародышей магнетита ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ). Белки MamB, MamE, MamH, MamM, MamN, MamO, MamP, MamT, MamX, MamZ и FtsZm

участвуют в этом процессе, поддерживая необходимую химическую среду, хотя их точные функции до конца не изучены. Заключительной стадией формирования магнитосом выступает кристаллизация, где белки MamC, MamD, MamF, MamG, MamR, MamS, Mms6 и MmsF регулируют размер и морфологию кристаллов магнетита [23].

A. Kovács et al. [25] провели анализ отдельных и неупорядоченных цепочек близко расположенных магнитосом (рис. 1). Просвечивающая электронная микроскопия (ПЭМ) продемонстрировала, что конфигурация цепочки может быть наиболее важным фактором, влияющим на направление магнитной индукции в кристаллах магнетита и вокруг них. Сильно вытянутые формы и различные направления кристаллографического удлинения, зарегистрированные у *Desulfovibrio magneticus*, свидетельствуют о том, что определяющим фактором направления магнитной индукции в близко расположенных магнитосомах является, как правило, взаимодействие между частицами, анизотропия формы и магнитокристаллическая анизотропия.

Магнитотактические бактерии проявляют высокую способность к биоминерализации и адаптации к различным условиям окружающей среды. Обычно они образуют в магнитосомах либо оксид железа, либо сульфид железа, содержащие кристаллы магнетита

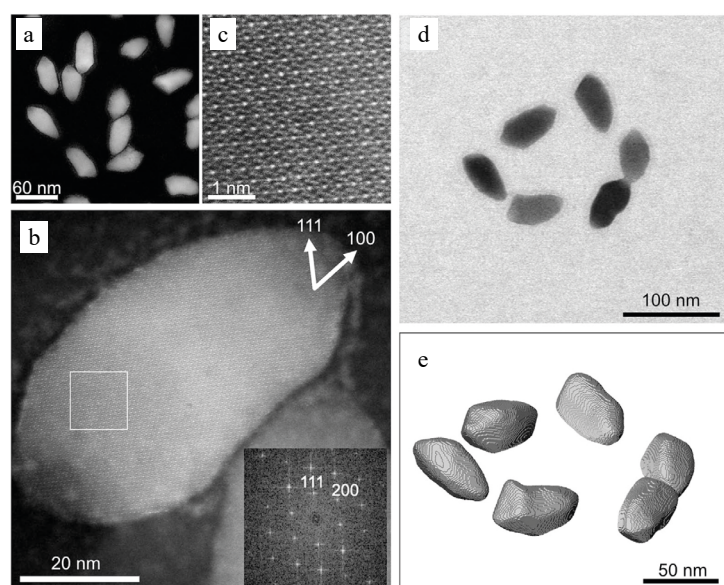


Рисунок 1. Структура и морфология магнетитовых магнитосом, выделенных из клеток *Desulfovibrio magneticus*

RS-1, по данным просвечивающей электронной микроскопии: а – рассеянные наночастицы магнетита; б – отдельная магнитосома и цифровая дифрактограмма (вставка), подтверждающая структуру магнетита и ось удлинения, параллельную  $\langle 100 \rangle$ ; в – структура магнетита при атомном разрешении; д – BF-изображение кольца магнетитовых магнитосом, полученное из серии tilt-изображений; е – томографическая реконструкция наночастиц, выявляющая наличие граней [25]

Figure 1. Structure and morphology of magnetite magnetosomes isolated from *Desulfovibrio magneticus* RS-1 cells, obtained by transmission electron microscopy: a – scattered magnetite nanoparticles; b – an individual magnetosome and a digital diffractogram (inset) confirming the magnetite structure and the elongation axis parallel to  $\langle 100 \rangle$ ; c – magnetite structure at atomic resolution; d – BF image of a ring of magnetite magnetosomes obtained from a series of tilt images; and e – tomographic reconstruction of nanoparticles, revealing the presence of facets [25]



или грейгита [26]. Некоторые другие бактерии также используют биологически контролируемую биоминерализацию для получения однородных кристаллических минералов. Например, *Rhodopseudomonas palustris* или *Escherichia coli* способны образовывать однородные кубические или гексагональные кристаллы сульфида кадмия [27]. Однако точные механизмы, управляющие этим процессом, до сих пор неизвестны. В то же время внутриклеточная бактериальная биоминерализация не всегда подвергается строгому контролю. Цианобактерии способны осаждать аморфные карбонатные отложения с нестандартной стехиометрией внутри клеток [28], тогда как *Rhodanobacter A2-61* – три типа кристаллических минералов, содержащих серебро или уран [29].

Внутриклеточная биоминерализация происходит также у эукариотических микроорганизмов. Этот процесс наблюдается у кокколитофоров – многочисленных одноклеточных морских водорослей, которые образуют кальцифицированные чешуйки в результате контролируемого внутриклеточного процесса. Внутриклеточный гомеостаз кальция динамически регулируется различными органеллами – эндоплазматическим ретикулумом, аппаратом Гольджи, вакуолями и лизосомами – посредством высвобождения и связывания ионов кальция [30]. Ацидокальцисомы – это специализированные кальцийсодержащие органеллы, обнаруженные у бактерий, простейших и млекопитающих; они рассматриваются как эволюционно наиболее древняя форма внутриклеточного депо кальция [31]. Среди микроводорослей ацидокальцисомы идентифицированы у ряда видов, включая модельную зеленую водоросль *Chlamydomonas reinhardtii* [32]. Характерной особенностью ацидокальцисом является высокая концентрация кальция, превышающая миллимолярные значения, что значительно выше, чем в других органеллах. Кроме того, ацидокальцисомы богаты фосфором, присутствующим в виде полифосфатов, и содержат другие одновалентные и двухвалентные катионы. А. Gal *et al.* [33] использовали модель кокколитофоров вида *Pleurochrysis carterae*, полученную с помощью клеточной криоскопии, для углубленного изучения внутриклеточных запасов кальция у подкласса *Calcihaptophycidae*. Используя cryoSXT и cryo-SEM/EDS, авторы выявили новый мембранный компартмент у кокколитофоров (*P. carterae*, *Emiliana huxleyi*), содержащий немембранные тельца, богатые кальцием и фосфором (рис. 2).

Динамическое распределение кальция в этом компартменте, вероятно, играет ключевую роль во внутриклеточной регуляции кальция и процессах биоминерализации. Сходный состав этих телец у обоих видов указывает на то, что данный механизм сохраняется у кокколитофоров. Отсутствие кальций-фосфатных телец (Ca-P-тельце) в более ранних цитологических исследованиях *P. carterae* может быть связано с артефактами, возникающими при подготовке препара-

тов [34]. В отличие от *Chlamydomonas reinhardtii*, где каждое Ca-P-тельце содержится в отдельной ацидокальцисоме, у *P. carterae* имеется несколько Ca-P-телец в пределах одного компартмента. *E. huxleyi* обычно содержит одно Ca-P-тельце в крупном компартменте [35]. Несмотря на различия в клеточной организации Ca-P-телец у этих видов, их минералогический состав схож. Эволюционно древний механизм концентрации и высвобождения кальция в Ca-P-тельцах предшествовал появлению кокколитофоров и впоследствии был адаптирован для кальцификации кокколитофоров водорослей-гаптофитов [36, 37].

Внеклеточная биоминерализация – широко распространенный процесс, происходящий в результате изменения химического состава микросреды под влиянием микробного метаболизма [20]. Существует множество примеров внеклеточной биоминерализации, в т. ч. образование: оксида железа – микроорганизмами, окисляющими Fe(II) [38]; оксида марганца – микроорганизмами, окисляющими Mn(II) [39]; кальцита, вызванное щелочностью, создаваемой кислородным фотосинтезом [40]; гипса ( $\text{CaSO}_4 \times 2\text{H}_2\text{O}$ ) – бактериями, окисляющими серу [41]; сульфида металла – бактериями, восстанавливающими сульфаты [42], а также отложением барита ( $\text{BaSO}_4$ ) в толще океанской воды [43].

Внеклеточная биоминерализация может быть активной или пассивной. Активная биоминерализация включает прямое окислительно-восстановительное преобразование ионов, связанных с поверхностью бактерий, или образование минералов из ионов, высвобождаемых в процессе метаболизма. Пассивная биоминерализация основана на неспецифическом связывании катионов и участии окружающих анионов, что приводит к зарождению и росту минералов [14]. Для осуществления внеклеточной биоминерализации необходимо соблюдение ряда условий. Микроорганизмы, участвующие в этом процессе, нуждаются в достаточном количестве растворимых веществ. Например, сапрофитные бактерии и грибы выделяют органические (карбоновые кислоты) и неорганические кислоты (например соляную) для растворения неорганического фосфата и снижения pH среды [44]. Кислотность среды оказывает существенное влияние на связывание ионов, поскольку кислая среда препятствует этому процессу, тогда как нейтральная или щелочная, напротив, способствует. Для образования минеральных кристаллов необходимы центры зарождения. Как правило, поверхности бактериальных клеток и внеклеточных полимерных веществ служат физическим субстратом для осаждения минералов, обеспечивая точки зарождения и влияя на морфологию и состав кристаллов.

**Роль белков в процессе биоминерализации.** Процесс образования и отложения неорганических минералов под воздействием биологических систем регулируется на молекулярном уровне. Биомолекулы, вовлеченные в этот процесс, играют важную роль в зарождении, кристаллизации и регуляции размера



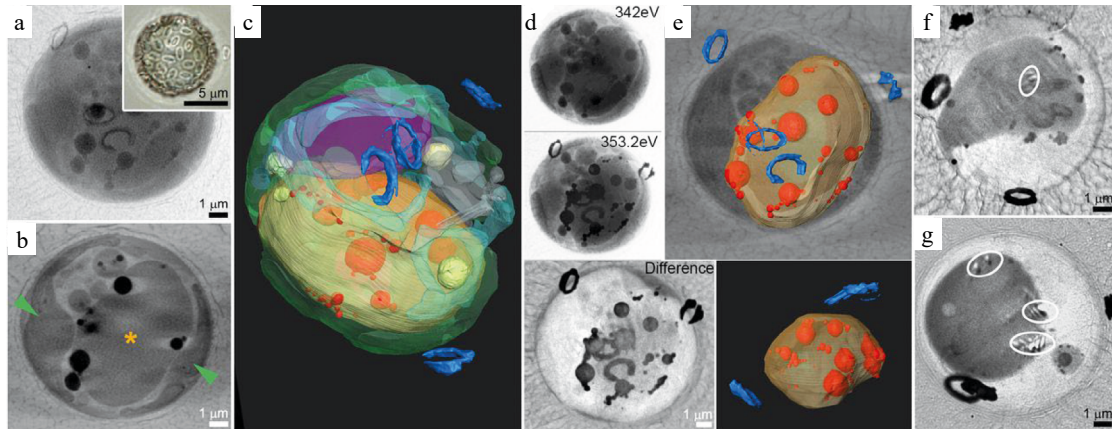


Рисунок 2. Криоснимки остеклованных клеток *Pleurochrysis carterae*, продуцирующих кокколиты: а – необработанное рентгеновское изображение клетки при наклоне 0° и энергии 520 эВ; вставка – световое микроскопическое изображение живой клетки со стенкой из кокколита; б – трехмерный срез реконструированного объема клетки, демонстрирующий хлоропласты (зеленые наконечники стрелок), крупный мембранный компартмент (\*), несколько везикул и рентгенопоглощающие тельца (темные); с – поверхностное изображение сегментированных структур: хлоропласты показаны зеленым, ядро – фиолетовым, крупные вакуолеобразные структуры – коричневым, липидные тельца – желтым, везикулы – серым, кокколиты – синим; д – Са-спектромикроскопические изображения до края поглощения (342,0 эВ), на краю поглощения (353,2 эВ) и соответствующая разностная карта, демонстрирующая области с высоким содержанием Са; е – трехмерная сегментация кальцийсодержащих структур: кокколиты показаны синим, богатые Са-тельца – красным, компартмент, в котором они локализованы, – коричневым; на изображении, полученном под другим углом, видно, что богатые Са-тельца расположены в одном компартменте; ф, г – Са-карты cryoSXT клеток *Pleurochrysis carterae*, демонстрирующие высокую концентрацию Са в просвете вакуолеобразного компартмента и наличие лишь нескольких небольших богатых Са-телец; белые эллипсы обозначают артефакты прямого луча, неизбежные для образцов такой толщины [33]

Figure 2. Cryo-images of vitrified *Pleurochrysis carterae* cells producing coccoliths: a – unprocessed X-ray image of a cell at a 0° tilt angle and 520 eV; inset – light microscopic image of a living cell with a coccolith wall; b – 3D slice of the reconstructed cell volume showing chloroplasts (green arrowheads), a large membrane compartment (\*), several vesicles, and X-ray-absorbing bodies (dark); c – surface rendering of segmented structures: chloroplasts are shown in green, the nucleus in purple, large vacuole-like structures in brown, lipid bodies in yellow, vesicles in gray, and coccoliths in blue; d – Ca spectromicroscopic images below the absorption edge (342.0 eV), at the absorption edge (353.2 eV), and the corresponding difference map showing areas with high Ca content; e – 3D segmentation of calcium-containing structures: coccoliths are shown in blue, Ca-rich bodies in red, and the compartment in which they are localized in brown; the view from a different angle shows that the Ca-rich bodies are located within the same compartment; and f, g – cryoSXT Ca-maps of *Pleurochrysis carterae* cells demonstrating a high Ca concentration in the lumen of the vacuole-like compartment and the presence of only a few small Ca-rich bodies; white ellipses indicate direct-beam artifacts, which are unavoidable for samples of this thickness [33]

неорганических кристаллов [45–47]; среди них ключевое значение имеют белки [48]. Идентификация таких белков важна для воспроизведения биоминерализации *in vitro* в условиях, имитирующих *in vivo* [49].

Наиболее распространенным биоминералом, синтез которого управляется белками, является  $\text{CaCO}_3$  [45, 48]. Соответственно, наиболее изучен процесс биоминерализации карбонатов, протекающий под воздействием фотолитоавтотрофов, в частности цианобактерий. Цианобактерии способны повышать pH внеклеточных растворов, не обладающих высокой буферной емкостью, что связано с их способностью связывать  $\text{CO}_2$  с помощью рибулозо-1,5-бифосфаткарбоксилаз-оксигеназы после поглощения бикарбонат-ионов. Карбоангидразы – ферменты, катализирующие обратимую гидратацию  $\text{CO}_2$ , – выполняют центральную функцию в регуляции pH и переработке неорганического

углерода. Они локализованы в микрокомпартаментах, ограниченных белковой оболочкой (карбоксисомами), где бикарбонат преобразуется в  $\text{CO}_2$ . Это приводит к высвобождению гидроксильных ионов, которые буферизуются за счет импорта  $\text{H}^+$  для регулирования внутриклеточного pH. В результате внеклеточный pH и, следовательно, насыщенность внеклеточного раствора повышаются по сравнению с карбонатными минеральными фазами [50]. Карбоангидразы – это металлоферменты, катализирующие обратимую гидратацию  $\text{CO}_2$ . Таким образом, они участвуют в регуляции pH и переработке неорганического углерода. Эти ферменты интенсивно изучались в контексте улавливания и связывания  $\text{CO}_2$  [51, 52]. Несмотря на их доказанную роль в кальцификации эукариот [53], их участие в бактериальном карбонатолизе часто недооценивается [54].

Карбоангидразы широко распространены в царстве бактерий. Они принадлежат к трем семействам ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ), которые, по-видимому, произошли от  $\gamma$ -подобных предковых карбоангидраз [55–57]. Существует значительное структурное разнообразие карбоангидраз: они могут существовать в виде мономеров или полимеров, в сочетании с низким сходством последовательностей [57]. Клеточная локализация также разнообразна: некоторые карбоангидразы являются внутриклеточными, внутриядерными, другие – периплазматическими или внеклеточными [56].

Внеклеточные полимерные вещества вносят существенный вклад в биоминерализации, влияя на полиморфизм карбонатов [58]. Их состав по урановой кислоте, углеводам и белкам определяет, будет ли преобладать осаждение арагонита или кальцита. Небольшие кислые белки, содержащие остаток аспарагиновой кислоты, незаменимы в этом процессе. Предполагается, что эти белки взаимодействуют с поверхностью растущих кристаллов-предшественников карбоната кальция, ингибируя дальнейшую трансформацию в наиболее стабильный полиморф – кальцит [59]. Аналогичные результаты получены при изменении содержания ксантана и присутствия кислых аминокислот [60]. Недавние исследования [61] показали, что внеклеточные полимерные вещества, продуцируемые представителями вида *Bacillus subtilis*, богаты кислыми аминокислотами, такими как глутаминовая и аспарагиновая, и служат центрами зарождения карбонатных минеральных фаз. Высокомолекулярные кислые белки, выделяемые некоторыми бактериями, также влияют на отложение различных минеральных фаз, включая карбонаты [62].

Некоторые функциональные группы внеклеточных белков могут адсорбировать свободный  $Sb(V)$  путем электростатического притяжения и хелатирования [63, 64]. Например, такой механизм отмечен у *D. vulgaris* Hildenborough, который дополнительно восстанавливал адсорбированный  $Sb(V)$  до  $Sb(III)$  во внеклеточных белках, образуя с серой и кислородом аморфные нанометровые осадки  $Sb_2S_3$  и  $Sb_2O_3$  соответственно [65, 66]. Установлено, что флавопротеины транспортируются из цитоплазмы во внеклеточный матрикс под действием  $Sb(V)$ , который служит окислительно-восстановительным челноком для переноса электронов из цитохромных сетей с-типа для восстановления внеклеточного  $Sb(V)$  [67, 68].

Белки *B. brevis* обладают более высоким сродством к  $Ag(I)$  для синтеза наночастиц серебра [69], что указывает на способность бактериальных белков стабилизировать металлические частицы, защищая их от ионов металлов. Внеклеточные белки другого микроорганизма – *D. vulgaris* Hildenborough [70] – обеспечивали адсорбцию  $Sb$  [71]. Некоторые микроорганизмы могут переносить электроны с внешних цитоплазматических мембран на внеклеточные металлы через сеть окислительно-восстановительных челноков и струк-

турных белков. Эти белки образуют «мост», соединяющий внутриклеточные метаболические процессы с окислительно-восстановительными реакциями внеклеточных адсорбированных металлов [72].

Внеклеточные белки (например флавопротеины) функционируют как диффузионные электронные челноки для переноса электронов. Таким образом, микроорганизмы разработали специализированные механизмы внеклеточного переноса электронов, опосредованные белками, для диссимиляционного восстановления металлов в богатых металлами средах [73]. Такие микроорганизмы используют мультигеновые цитохромы с-типа, расположенные в клеточной стенке, для диссимиляционного восстановления  $Fe(III)$  [74]. *Shewanella* sp. выделяют флавины для облегчения переноса электронов из клеток во внеклеточные  $Cr(VI)$  и  $Fe(III)$  [75]. Примечательно, что в ходе исследования показана транспортировка флавопротеин из внутриклеточного пространства во внеклеточный матрикс путем неограниченной диффузии [76, 77], повышающая окислительно-восстановительный потенциал для увеличения скорости переноса электронов [78].

Это приводит к воспроизводимой и однородной морфологии кристаллов [79, 80]. С другой стороны, при биологически контролируемой минерализации поверхность бактериальных клеток и внеклеточно секретируемые органические полимерные вещества выполняют аналогичную функцию, что обеспечивает широкий спектр морфологий кристаллов карбоната кальция [81, 82]. Более того, обнаружено, что выбор органической матрицы также влияет на структурную и термическую стабильность биоминерала [83].

Современные исследования биоминерализации демонстрируют, что органические матрицы в местах кальцификации состоят преимущественно из белков и полисахаридов. У различных организмов, включая моллюсков, красные водоросли, кокколитофоров и фораминиферов [84], кальцифицирующие макромолекулы обогащены кислотными функциональными группами: белки содержат высокую долю карбоксиллированных аминокислот, а полисахариды характеризуются высокой степенью сульфатирования и карбоксиллирования [85, 86]. Преобладание карбоксилатных и сульфатных групп в местах минерализации указывает на их функциональную значимость в процессах зарождения и роста кристаллов. Предполагается, что заряженные белки играют активную регуляторную роль в минерализации, тогда как полисахариды, например хитин в раковинах моллюсков, образуют инертный структурный каркас. Однако молекулярные механизмы этих взаимодействий требуют дальнейшего изучения. А. J. Giuffrè *et al.* [87] отмечают, что локальное пересыщение определяет относительные скорости зарождения на заряженных и нейтральных подложках. Полученные результаты предполагают модель зарождения, основанную на непрерывности взаимодействий между подложкой и жидким кристаллом, регулируемых кислотными

и нейтральными доменами. Эта модель побуждает к переосмыслению роли нейтральных макромолекул в кальцификации, указывая на то, что их способность снижать энергетический барьер может быть важным и ранее недооцененным фактором [88].

Недавние исследования показали, что белки и полисахариды частично ответственны за полиморфную селективность [88–90]. Эти органические матрицы влияют на характер зарождения и морфологию кристаллов, чем и определяют полиморфную селективность. В результате образуются стабильные кристаллические структуры, которые в противном случае были бы термодинамически неблагоприятными [22, 79–81].

Бесконтактная и неразрушающая диагностика карбонатов, полученных в результате минерализации и представляющих интерес для материаловедения и промышленности, осуществляется оптическими методами с использованием количественных характеристик колебательных мод. Анализ колебательных спектров карбонатов позволяет прогнозировать и воспроизводить полные колебательные спектры кристаллических соединений и, основываясь на обычных спектральных зависимостях, предсказывать их особенности для твердых кристаллических растворов [91].

Одним из наиболее интересных аспектов микробиологической биоминерализации является способность контролировать морфологию и размер кристаллов биоминерала. Исследования биоминерализации у высших эукариот, таких как кости и раковины моллюсков, выявили роль органических фрагментов в зарождении и росте кристаллов [92]. Логично предположить, что биоорганические молекулы и биополимеры также являются важным компонентом биоминерализации микроорганизмов. Установлено, что различные белки, полисахариды и другие внеклеточные или внутриклеточные полимерные вещества фактически служат матрицей в процессе кристаллизации, обеспечивая необходимый контроль над их формой и морфологией [93]. Таким образом, современные исследования микробной биоминерализации в значительной степени сосредоточены на взаимодействии органических и неорганических поверхностей раздела при формировании кристаллической структуры.

В случае биологически контролируемой биоминерализации идентификация органических молекул, участвующих в формировании морфологии кристаллов, облегчается благодаря полному контролю клетки над каждой стадией синтеза. Бактериальная клетка вырабатывает специфические белки, единственной целью которых является контроль формы, размера и полиморфной модификации биоминерала. В ходе многолетних исследований в мембране магнитосомы идентифицированы различные белки, обеспечивающие кристаллизацию частиц магнетита. Например, по меньшей мере шесть белков, специфичных для магнитотактических бактерий, выполняют эту функцию. Эти белки, кодируемые оперонами *mmsb* и *tamGFDC*,

не являются основными в биоминерализации, однако, как установлено, они регулируют размер и морфологию магнетита. Удаление этих оперонов по отдельности или в комбинации значительно уменьшало размер частиц магнетита по сравнению со штаммами дикого типа [94, 95]. A. Arakaki *et al.* [79] показали, что контроль размера октаэдрических кристаллов магнетита обеспечивается белками MamC, MamD, MamG и Mmsb. Важно отметить, что эти гены не обнаружены у штаммов, синтезирующих кристаллы в форме пули. Предполагается, что эти белки взаимодействуют с поверхностью магнетита после совместной локализации в мембране магнитосом [22].

Магнитотактические бактерии синтезируют специфические белки, кодируемые геном *mmsb* и опероном *tamGFDC*, которые служат матрицами для зарождения и роста кристаллов магнетита. Белки магнитосомной мембраны, а также мембраноспецифичные белки можно разделить на несколько групп в зависимости от их роли в процессах формирования магнитосом – инвагинации мембраны, сортировке белков, выравнивании цепей магнитосом, биоминерализации и контроле формы и размера минеральных кристаллов. Основные характеристики указанных белков приведены в таблице 1 (на основе данных S. Barber-Zucker *et al.* [22]).

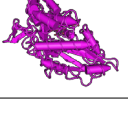
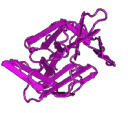
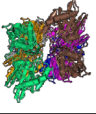
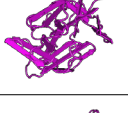
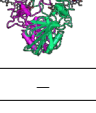
Одним из первых генов, связанных с организацией магнитосом, является актиноподобный *tamK* [96]. Динамическая АТФ-зависимая полимеризация белка MamK опосредует перемещение магнитосом из мест зарождения в их конечное положение в клетке [97]. У *Magnetospirillum* spp. адаптерный белок MamJ связывает мембрану магнитосомы с нитью белка MamK, регулируя динамику полимеризации и способствуя образованию цепи [98]. Интегральный мембранный белок MamY также участвует в расположении магнитосом у *Magnetospirillum* spp. и вибрионов, определяя линию формирования цепочки вдоль наиболее выпуклой части мембраны.

Образование минерала магнетита в компартменте магнитосомы требует контролируемого переноса ионов. MamB и MamM, представители семейства белков, способствующих диффузии катионов (CDF), обеспечивают импорт двухвалентного железа из цитоплазмы в просвет магнитосомы, используя движущую силу [102].

Транспорт ионов, необходимый для образования магнетита в магнитосомах, осуществляется несколькими белками. MamH и MamZ – гомологи белков MFS – являются предполагаемыми переносчиками железа; их совместное удаление критически ухудшает образование кристаллов [108]. MamO – гомолог транспортеров TauE – может быть вовлечен в транспорт ионов и / или активацию MamE [118]. Поддержание щелочной среды, необходимой для образования магнетита, осуществляется MamB, MamM [119] и, предположительно, MamN (гомологом антипортера  $\text{Na}^+/\text{H}^+$ ), удаление которого приводит к образованию пустых

Таблица 1. Основные характеристики белков Mam и Mms [22]

Table 1. Key characteristics of Mam and Mms proteins [22]

| Белок | Кодирующий оперон | Структура NCBI                                                                      | Роль в образовании магнетосом                              | Источник   |
|-------|-------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|------------|
| Mam   | <i>tamAB</i>      |    | Сортировка белков                                          | [99–101]   |
| MamB  | <i>tamAB</i>      |    | Впячивание мембраны, транспорт железа                      | [102]      |
| MamC  | <i>tamGFDC</i>    |    | Контроль размера и формы кристаллов                        | [103, 104] |
| MamD  | <i>tamGFDC</i>    | —                                                                                   | Контроль размера и формы кристаллов                        | [79]       |
| MamE  | <i>tamAB</i>      |    | Сортировка белков, окислительно-восстановительный контроль | [105]      |
| MamF  | <i>tamGFDC</i>    | —                                                                                   | Контроль размера кристаллов                                | [106]      |
| MamG  | <i>tamGFDC</i>    | —                                                                                   | Контроль размера кристаллов                                | [107]      |
| MamH  | <i>tamAB</i>      | —                                                                                   | Транспорт железа                                           | [108]      |
| MamI  | <i>tamAB</i>      | —                                                                                   | Инвагинация мембраны                                       | [105]      |
| MamJ  | <i>tamAB</i>      | —                                                                                   | Выравнивание магнетосомы                                   | [109]      |
| MamK  | <i>tamAB</i>      |  | Выравнивание магнетосомы                                   | [110]      |
| MamL  | <i>tamAB</i>      | —                                                                                   | Инвагинация мембраны                                       | [105]      |
| MamM  | <i>tamAB</i>      |  | Транспорт железа                                           | [102]      |
| MamN  | <i>tamAB</i>      | —                                                                                   | Контроль pH                                                | [22]       |
| MamO  | <i>tamAB</i>      |  | Зарождение кристаллов                                      | [111]      |
| MamP  | <i>tamAB</i>      |  | Окислительно-восстановительный контроль                    | [112]      |
| MamQ  | <i>tamAB</i>      | —                                                                                   | Инвагинация мембраны                                       | [22]       |
| MamR  | <i>tamAB</i>      | —                                                                                   | Контроль размера и количества кристаллов                   | [22]       |
| MamS  | <i>tamAB</i>      | —                                                                                   | Контроль размера и формы кристаллов                        | [22]       |
| MamT  | <i>tamAB</i>      | —                                                                                   | Окислительно-восстановительный контроль                    | [113]      |
| MamX  | <i>tamXY</i>      | —                                                                                   | Окислительно-восстановительный контроль                    | [108]      |
| MamY  | <i>tamXY</i>      | —                                                                                   | Инвагинация мембраны                                       | [114]      |
| MamZ  | <i>tamXY</i>      | —                                                                                   | Транспорт железа, окислительно-восстановительный контроль  | [108]      |
| FtsZm | <i>tamXY</i>      | —                                                                                   | Контроль размера и формы кристаллов, денитрификация        | [115]      |
| Mms6  | <i>mms6</i>       | —                                                                                   | Контроль размера и формы кристаллов                        | [116]      |
| MmsF  | <i>mms6</i>       | —                                                                                   | Контроль размера и формы кристаллов                        | [117]      |

Примечание: «—» – в базе данных NCBI отсутствует изображение пространственной структуры соответствующего белка.

Note: “—” – the NCBI database does not contain an image of the spatial structure of the corresponding protein.



везикул [21]. Соотношение Fe(II):Fe(III) регулируется магнитохромами MamP, MamX, MamT и MamE, которые содержат гем с-типа [120]. MamP обладает активностью железooksидазы *in vitro* [121], а MamZ, в дополнение к своей транспортной функции, может проявлять активность железоредуктазы, аналогичную YedZ [108].

Белки Mms6 и Mms7, обладающие высоким сродством к Fe(II), вероятно, инициируют зарождение магнетита, увеличивая локальную концентрацию ионов железа [123]. Mms6 – наиболее распространенный белок в магнетосомах – играет ключевую роль в образовании ядер *in vivo* и *in vitro* [123, 124]. Предполагается, что множественные предядерные кластеры, образовавшиеся на С-конце Mms6, сливаются, образуя магнетитовое ядро, дальнейший рост которого происходит за счет агломерации этих кластеров на поверхности кристалла. Размер и форма кристаллов магнетита [125], определяющие магнитные свойства бактерий, контролируются белками семейства Mms. К ним относятся Mms5, Mms6, Mms7 (MamD) и Mms13 (MamC), которые локализованы в мембране магнитосом и регулируют рост кристаллов [79]. Их трансмембранные домены обеспечивают сортировку и самосборку, а гидрофильные кислые домены, обогащенные аминокислотами и обращенные к просвету магнитосом, связывают железо. Делеции генов *mms* изменяют размер и морфологию, но не количество кристаллов, что указывает на их роль в образовании кубооктаэдрических кристаллов, характерных для магнитотактических бактерий (МТВ). Каждый белок Mms специфически влияет на скорость роста определенных граней кристаллов. Mms6 также участвует в организации магнитосом, взаимодействуя с MamA и воздействуя на локализацию Mms5, Mms7 и Mms13 [124]. Белок MmsF необходим для созревания кристаллов, контролируя их рост после достижения размера около 25 нм [117].

Для изучения влияния органических матриц на рост кристаллов используется ряд аналитических методов. Спектроскопические методы *in situ* (рамановская и ИК-спектроскопия) позволяют отслеживать молекулярные взаимодействия в режиме реального времени, предоставляя информацию об изменениях в химическом окружении, молекулярной конформации и динамике адсорбции. Комбинация этих методов с методами визуализации *in situ* обеспечивает корреляцию молекулярных событий с морфологическими изменениями, что дает всестороннее понимание механизмов роста кристаллов [126, 127]. Микроскопия высокого разрешения (например атомно-силовая и сканирующая электронная микроскопия) служит для визуализации поверхности кристаллов на наноуровне [128, 129], что предоставляет возможно наблюдать динамику ступенчатого роста, дефекты поверхности и эффекты, связанные с органическими матрицами. Моделирование молекулярной динамики, дополненное экспериментальными методами, обеспечивает изучение динамики

молекулярных перестроек, диффузию растворенных веществ и эволюцию центров зарождения [130, 131]. Спектроскопия с временным разрешением (насосно-зондовая или флуоресцентная спектроскопия) дает возможность отслеживать изменения конформации молекул, связывание растворенных веществ и структурные перестройки [132, 133]. ЯМР-спектроскопия высокого разрешения предоставляет информацию о структурных и динамических свойствах органических матриц, благодаря чему идентифицируются молекулярные мотивы, конформационная динамика и межмолекулярные взаимодействия. Анализ химических сдвигов и констант связи в спектрах ядерного магнитного резонанса дает информацию о механизмах зарождения молекул [134]. За счет рентгеноструктурного анализа можно определить атомную структуру кристаллов, выявляя влияние органических матриц на упаковку, межмолекулярные расстояния и расположение растворенных веществ в кристаллической решетке. Сочетание дифракции рентгеновских лучей с другими методами исследования обеспечивает всестороннее понимание молекулярных процессов, происходящих во время нуклеации [130, 135]. Вычислительные методы, такие как молекулярная динамика, применимы для изучения биоминерализации на атомарном уровне. Однако точное моделирование роли воды в зарождении, особенно для заряженных частиц, затруднено из-за сложности учета водородных связей и перегруппировки гидроксильных групп фосфат-ионов. Метод *ab initio* MD, основанный на теории функционала плотности, обеспечивает более точное описание химических реакций, включая разрушение и образование связей, но он ограничен высокими вычислительными затратами. Межатомные потенциалы машинного обучения – многообещающий подход, сочетающий вычислительную эффективность классической молекулярной динамики с точностью, приближающейся к методу *ab initio* MD, открывая новые возможности для моделирования сложных процессов биоминерализации [136].

Изучение процесса зарождения *in situ* в условиях реакции является сложной задачей. Применение методов определения характеристик *in situ*, которые обеспечивают наблюдение за процессом зарождения в режиме реального времени, может предоставить важную информацию. Развитие методов спектроскопии и визуализации *in situ* откроет новые возможности для понимания процессов зарождения в сложных системах. Переход от изучения статических структур к изучению динамики зарождения считается актуальным направлением. Методы с высоким временным разрешением, такие как сверхбыстрая спектроскопия и рентгеновская кристаллография с временным разрешением, позволят выявить динамическую природу нуклеации, контролируемой органической матрицей.

**Применение биоминерализации в промышленности.** Магнитосомы и биоминералы, синтезируемые

магнитотактическими бактериями, обладают рядом преимуществ перед химически синтезированными наночастицами оксида железа, такими как простота диспергирования и функционализации. В биомедицинской промышленности магнитосомы и наночастицы магнетита используются в качестве контрастных веществ при магнитно-резонансной томографии, для гипертермической терапии опухолей, таргетной доставки лекарств, а также для обнаружения энтеротоксинов в упакованных пищевых продуктах, антигенов при диагностике гепатита В и в биосенсорах для детской диагностики в местах оказания медицинской помощи [137–144]. Недавние сообщения указывают на перспективность применения наночастиц магнетита в интеллектуальной доставке лекарств, лабораторной диагностике на чипе, магнитной биоразделке и таргетной терапии рака [145, 146]. Кроме того, их используют для удаления тяжелых металлов из сточных вод, генерации электроэнергии за счет электромагнитной индукции и иммобилизации ферментов для облегчения очистки от фосфорорганических соединений [146–148]. J. Shen *et al.* в исследовании [149] показали, что магнитотактические бактерии также рассматриваются в качестве модельных организмов в астробиологических исследованиях, т. к. они обладают высокой устойчивостью к радиации, иссушению, гипомангнитной и богатой металлами среде, а также к условиям микрогравитации. Минералы, которые получены с участием микроорганизмов, например карбонат кальция, активно используются не только в области медицины, но и в инженерной экологии – для стабилизации почв в сельском хозяйстве и мелиорации [150–155].

В последние годы в качестве перспективного метода защиты и восстановления разрушенных строительных конструкций и материалов предложена микробиологическая внеклеточная биоминерализация. Карбонатогенные бактерии, способные биоминерализовать карбонат кальция, используются для сохранения и реставрации объектов культурного наследия. Разрабатываются различные технологии, основанные на использовании макромолекул карбонатогенных микроорганизмов и стимуляции биоминерализации микробиоты, населяющей камень, с помощью питательных растворов [156–161]. Во всех этих стратегиях микробно-опосредованная биоминерализация является ключевым фактором укрепления и восстановления разрушенных строительных материалов. Несмотря на высокий коммерческий потенциал микробных биоминералов, их промышленное производство и широкое применение ограничены недостаточным пониманием механизмов их формирования и отсутствием эффективных подходов к их разработке. Поэтому детальное и всестороннее изучение молекулярных механизмов микробной биоминерализации является необходимым условием для разработки биотехнологических приложений [158–163].

## Выводы

В статье представлен обзор современных знаний о механизмах биоминерализации – процесса, играющего важную роль в формировании как геологических отложений, так и биологических структур. Биоминерализация подразделяется на два основных типа по месту отложения минеральных фаз (внеклеточная и внутриклеточная), а также на два типа по степени участия живых организмов (биологически контролируемая и биологически индуцированная). Особое внимание уделяется роли белковых молекул в биоминерализации, осуществляемой микроорганизмами.

Установлено, что белки выполняют следующие ключевые функции в процессе минерализации:

1. Перенос электронов. Внеклеточные белки, например флавопротеины, переносят электроны с цитоплазматических мембран на внеклеточные металлы. Этот механизм позволяет микроорганизмам использовать металлы в качестве конечных акцепторов электронов в процессе дыхания, что является необходимым условием их выживания в богатой металлами среде.

2. Контроль образования минералов. Бактериальные белки могут служить матрицами для зарождения и роста минеральных кристаллов, влияя на их морфологию, размер и полиморфную модификацию.

3. Защита минеральных частиц. Бактериальные белки способны формировать защитный слой на поверхности минеральных частиц, предотвращая их разрушение.

Таким образом, ключевым фактором в биоминерализации выступают внеклеточные белки, обеспечивающие микроорганизмам возможность контролировать формирование минеральных структур и использовать металлы в качестве источников энергии. Дальнейшие исследования механизмов, лежащих в основе этого процесса, могут привести к разработке новых биотехнологий и материалов с уникальными свойствами.

## Критерии авторства

Авторы в равной степени участвовали в подготовке и написании статьи.

## Конфликт интересов

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

## Contribution

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

## 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. Jing R, Kjellerup BV. Biogeochemical cycling of metals impacting by microbial mobilization and immobilization. *Journal of Environmental Sciences*. 2018;66:146–154. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2017.04.035>
2. Chandrangsu P, Rensing C, Helmann JD. Metal homeostasis and resistance in bacteria. *Nature Reviews Microbiology*. 2017;15(6):338–350. <https://doi.org/10.1038/nrmicro.2017.15>.
3. Alshalif AF, Irwan JM, Othman N, Al-Gheethi AA, Shamsudin S. A systematic review on bio-sequestration of carbon dioxide in bio-concrete systems: A future direction. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. 2020;26(3):1209–1228. <https://doi.org/10.1080/19648189.2020.1713899>
4. Liu P, Zheng Y, Zhang R, Bai J, Zhu K, et al. Key gene networks that control magnetosome biomineralization in magnetotactic bacteria. *National Science Review*. 2023;10(1):nwac238. <https://doi.org/10.1093/nsr/nwac238>
5. Liu Y, Ali A, Su JF, Li K, Hu RZ, et al. Microbial-induced calcium carbonate precipitation: Influencing factors, nucleation pathways, and application in waste water remediation. *Science of the Total Environment*. 2023;860:160439. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160439>
6. Sriaporn C, Komonjinda S, Awiphan S, Santitharangkun S, Banjongprasert C, et al. Mineralogical and microbial characterization of alkali hot spring microbial mats and deposits in Pong Duet Pa Pac hot spring, Northern Thailand. *Extremophiles*. 2024;28:29. <https://doi.org/10.1007/s00792-024-01343-5>
7. Yang G, Li F, Deng Z, Wang Y, Su Z, et al. Abnormal crystallization sequence of calcium carbonate in the presence of *Synechococcus* sp. PCC 7942. *Geomicrobiology Journal*. 2023;40(1):34–45. <https://doi.org/10.1080/01490451.2022.2100948>
8. Gadd GM. Fungal biomineralization. *Current Biology*. 2021;31(24):R1557–R1563. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2021.10.041>
9. Ge J, Guo K, Huang Y, Morse PD, Zhang C, et al. Comparison of antagonistic effects of nanoparticle-selenium, selenium-enriched yeast and sodium selenite against cadmium-induced cardiotoxicity via AHR/CAR/PXR/Nrf2 pathways activation. *The Journal of Nutritional Biochemistry*. 2022;105:108992. <https://doi.org/10.1016/j.jnutbio.2022.108992>
10. Durak GM, Taylor AR, Walker CE, Probert I, Vargas C, et al. A role for diatom-like silicon transporters in calcifying coccolithophores. *Nature Communications*. 2016;7:10543. <https://doi.org/10.1038/ncomms10543>
11. 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>
12. Weiner S, Dove PM. An overview of biomineralization processes and the problem of the vital effect. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*. 2003;54(1):1–29. <https://doi.org/10.2113/0540001>
13. Seifan M, Berenjian A. Microbially induced calcium carbonate precipitation: A widespread phenomenon in the biological world. *Applied Microbiology and Biotechnology*. 2019;103:4693–4708. <https://doi.org/10.1007/s00253-019-09861-5>
14. Frankel RB, Bazylinski DA. Biologically induced mineralization by bacteria. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*. 2003;54(1):95–114. <https://doi.org/10.2113/0540095>
15. Lin W, Benzerara K, Faivre D, Pan Y. Intracellular biomineralization in bacteria. *Frontiers in Microbiology*. 2014;5:293. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2014.00293>
16. Faivre D, Godec TU. From bacteria to mollusks: The principles underlying the biomineralization of iron oxide materials. *Angewandte Chemie International Edition*. 2015;54(16):4728–4747. <https://doi.org/10.1002/anie.201408900>
17. McCausland HC, Komeili A. Magnetic genes: Studying the genetics of biomineralization in magnetotactic bacteria. *PLOS Genetics*. 2020;16(2):e1008499. <https://doi.org/10.1371/journal.pgen.1008499>
18. Jacob JJ, Suthindhiran K. Magnetotactic bacteria and magnetosomes – scope and challenges. *Materials Science and Engineering: C*. 2016;68:919–928. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2016.07.049>
19. Rodrigues AE. Isolation of magnetotactic bacteria from freshwater sources of Goa. *International Journal for Multi-disciplinary Research*. 2026;8(3):1–50.
20. Yan L, Da H, Zhang S, López VM, Wang W. Bacterial magnetosome and its potential application. *Microbiological Research*. 2017;203:19–28. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2017.06.005>
21. Qin W, Wang C-y, Ma Y-x, Shen M-j, Li J, et al. Microbe-mediated extracellular and intracellular mineralization: Environmental, industrial, and biotechnological applications. *Advanced Materials*. 2020;32(22):1907833. <https://doi.org/10.1002/adma.201907833>
22. Komeili A. Molecular mechanisms of compartmentalization and biomineralization in magnetotactic bacteria. *FEMS Microbiology Reviews*. 2012;36(1):232–255. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6976.2011.00315.x>
23. Barber-Zucker S, Keren-Khadmy N, Zarivach R. From invagination to navigation: The story of magnetosome-associated proteins in magnetotactic bacteria. *Protein Science*. 2015;25(2):338–351. <https://doi.org/10.1002/pro.2827>
24. Cypriano J, Castro J, Taveira I, Correa T, Acosta-Avalos D, et al. Magnetosome biomineralization by magnetotactic bacteria. In: Berenjian A, Seifan M, editors. *Methods in enzymology*. Springer International Publishing; 2021. pp. 135–167. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-80807-5\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-030-80807-5_7)

25. Kovács A, Pósai M, Zingsem B, Li Z-A, Pekker P, *et al.* Influence of crystal shape and orientation on the magnetic microstructure of bullet-shaped magnetosomes synthesized by magnetotactic bacteria. *Geo-Bio Interfaces*. 2024;1:e1. <https://doi.org/10.1180/gbi.2024.3>
26. Jajan LH-G, Hosseini SN, Ghorbani M, Mousavi SF, Ghareyazie B, *et al.* Effects of environmental conditions on high-yield magnetosome production by *Magnetospirillum gryphiswaldense* MSR-1. *Iranian Biomedical Journal*. 2019;23(3): 209–219. <http://dx.doi.org/10.29252/ibj.23.3.209>
27. Sakpirom J, Kantachote D, Siripattanakul-Ratpukdi S, McEvoy J, Khan E. Simultaneous bioprecipitation of cadmium to cadmium sulfide nanoparticles and nitrogen fixation by *Rhodopseudomonas palustris* TN110. *Chemosphere*. 2019; 223:455–464. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.02.051>
28. Xing SF, Tian HF, Yan Z, Song C, Wang SG. Stability and biomineralization of cadmium sulfide nanoparticles biosynthesized by the bacterium *Rhodopseudomonas palustris* under light. *Journal of Hazardous Materials*. 2023;458:131937. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.131937>
29. Sousa T, Chung A-P, Pereira A, Piedade AP, Morais PV. Aerobic uranium immobilization by *Rhodanobacter* A2-61 through formation of intracellular uranium–phosphate complexes. *Metallomics*. 2013;5(4):390–397. <https://doi.org/10.1039/c3mt00052d>
30. Docampo R, Huang G. New insights into the role of acidocalcisomes in trypanosomatids. *Journal of Eukaryotic Microbiology*. 2022;69(6):e12899. <https://doi.org/10.1111/jeu.12899>
31. Docampo R, Souza W, Miranda K, Rohloff P, Moreno SN. Acidocalcisomes? Conserved from bacteria to man. *Nature Reviews Microbiology*. 2005;3:251–261. <https://doi.org/10.1038/nrmicro1097>
32. Ruiz FA, Marchesini N, Seufferheld M, Govindjee, Docampo R. The polyphosphate bodies of *Chlamydomonas reinhardtii* possess a proton-pumping pyrophosphatase and are similar to acidocalcisomes. *The Journal of Biological Chemistry*. 2001;276(49):46196–46203. <https://doi.org/10.1074/jbc.M105268200>
33. Gal A, Sorrentino A, Kahil K, Pereiro E, Faivre D, *et al.* Native-state imaging of calcifying and noncalcifying microalgae reveals similarities in their calcium storage organelles. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2018; 115(43):11000–11005. <https://doi.org/10.1073/pnas.1804139115>
34. Marsh ME. Regulation of CaCO<sub>3</sub> formation in coccolithophores. *Comparative Biochemistry and Physiology Part B*. 2003;136(4):743–754. [https://doi.org/10.1016/s1096-4959\(03\)00180-5](https://doi.org/10.1016/s1096-4959(03)00180-5)
35. Sviben S, Gal A, Hood MA, Bertinetti L, Politi Y, *et al.* A vacuole-like compartment concentrates a disordered calcium phase in a key coccolithophorid alga. *Nature Communications*. 2016;7:11228. <https://doi.org/10.1038/ncomms11228>
36. Patel S, Docampo R. Acidic calcium stores open for business: expanding the potential for intracellular Ca<sup>2+</sup> signaling. *Trends in Cell Biology*. 2010;20(5):277–286. <https://doi.org/10.1016/j.tcb.2010.02.003>
37. Vargas C, Aubry M-P, Probert I, Young JR. Origin and evolution of coccolithophores: From coastal hunters to oceanic farmers. In: Falkowski PG, Knoll AH, editors. *Evolution of primary producers in the sea*. New York: Academic Press; 2007. pp. 251–285. <https://doi.org/10.1016/B978-012370518-1/50013-8>
38. Bryce C, Blackwell N, Schmidt C, Otte J, Huang Y, *et al.* Microbial anaerobic Fe(II) oxidation – ecology, mechanisms and environmental implications. *Environmental Microbiology*. 2018;20(10):3462–3483. <https://doi.org/10.1111/1462-2920.14328>
39. Wright MH, Farooqui SM, White AR, Greene AC. Production of manganese oxide nanoparticles by *Shewanella* species. *Applied and Environmental Microbiology*. 2016;82(17):5402–5409. <https://doi.org/10.1128/AEM.00663-16>
40. Zhu T, Dittrich M. Carbonate precipitation through microbial activities in natural environment, and their potential in biotechnology: A review. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. 2016;4:4. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2016.00004>
41. Harouaka K, Mansor M, Macalady JL, Fantle MS. Calcium isotopic fractionation in microbially mediated gypsum precipitates. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2016;184:114–131. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2016.03.003>
42. Thiel J, Byrne JM, Kappler A, Schink B, Pester M. Pyrite formation from FeS and H<sub>2</sub>S is mediated through microbial redox activity. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2019;116(14):6897–6902. <https://doi.org/10.1073/pnas.1814412116>
43. Martinez-Ruiz F, Jroundi F, Paytan A, Guerra-Tschuschke I, Mar Abad M, *et al.* Barium bioaccumulation by bacterial biofilms and implications for Ba cycling and use of Ba proxies. *Nature Communications*. 2018;9:1619. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-04069-z>
44. Wei Y, Zhao Y, Shi M, Cao Z, Lu Q, *et al.* Effect of organic acids production and bacterial community on the possible mechanism of phosphorus solubilization during composting with enriched phosphate-solubilizing bacteria inoculation. *Bioresource Technology*. 2018;247:190–199. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.09.092>
45. Różycka M, Wojtas M, Jakób M, Stigloher C, Grzeszkowiak M, *et al.* Intrinsically disordered and pliable starmaker-like protein from medaka (*Oryzias latipes*) controls the formation of calcium carbonate crystals. *PLOS ONE* 2014;9(12):e114308. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0114308>
46. Addadi L, Weiner S, Geva M. On how proteins interact with crystals and their effect on crystal formation. *Zeitschrift für Kardiologie*. 2001;90:92–98. <https://doi.org/10.1007/s003920170049>



47. Boskey AL. Biomineralization: An overview. *Connective Tissue Research*. 2003;44(1):5–9. <https://doi.org/10.1080/03008200390152007>
48. Liu C, Xie L, Zhang R. Heterogeneous distribution of dye-labelled biomineralization proteins in calcite crystals. *Scientific Reports*. 2016;5:18338. <https://doi.org/10.1038/srep18338>
49. Niide T, Ozawa K, Nakazawa H, Oliveira D, Kasai H, et al. Organic crystal-binding peptides: Morphology control and one-pot formation of protein-displaying organic crystals. *Nanoscale*. 2015;47:20155–20163. <https://doi.org/10.1039/C5NR06471F>
50. Taylor AR, Brownlee C, Wheeler G. Coccolithophore cell biology: Chalking up progress. *Annual Review of Marine Science*. 2017;9:283–310. <https://doi.org/10.1146/annurev-marine-122414-034032>
51. Bose H, Satyanarayana T. Microbial carbonic anhydrases in biomimetic carbon sequestration for mitigating global warming: Prospects and perspectives. *Frontiers in Microbiology*. 2017;8:1615. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.01615>
52. Effendi SSW, Ng I-S. The prospective and potential of carbonic anhydrase for carbon dioxide sequestration: A critical review. *Process Biochemistry*. 2019;87:55–65. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2019.08.018>
53. Roy NL, Jackson DJ, Marie B, Ramos-Silva P, Marin F. The evolution of metazoan  $\alpha$ -carbonic anhydrases and their roles in calcium carbonate biomineralization. *Frontiers in Zoology*. 2014;11:75. <https://doi.org/10.1186/s12983-014-0075-8>
54. Achal V, Pan X. Characterization of urease and carbonic anhydrase producing bacteria and their role in calcite precipitation. *Current Microbiology*. 2010;62:894–902. <https://doi.org/10.1007/s00284-010-9801-4>
55. Smith KS, Ferry JG. Prokaryotic carbonic anhydrases. *FEMS Microbiology Reviews*. 2000;24(4):335–366. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6976.2000.tb00546.x>
56. Capasso C, Supuran CT. An overview of the alpha-, beta- and gamma-carbonic anhydrases from *Bacteria*: Can bacterial carbonic anhydrases shed new light on evolution of bacteria? *Journal of Enzyme Inhibition and Medicinal Chemistry*. 2015;30(2):325–332. <https://doi.org/10.3109/14756366.2014.910202>
57. Supuran CT, Capasso C. New light on bacterial carbonic anhydrases phylogeny based on the analysis of signal peptide sequences. *Journal of Enzyme Inhibition and Medicinal Chemistry*. 2016;31(6):1254–1260. <https://doi.org/10.1080/14756366.2016.1201479>
58. Kawaguchi T, Decho AW. A laboratory investigation of cyanobacterial extracellular polymeric secretions (EPS) in influencing  $\text{CaCO}_3$  polymorphism. *Journal of Crystal Growth*. 2002;240(1–2):230–235. [https://doi.org/10.1016/S0022-0248\(02\)00918-1](https://doi.org/10.1016/S0022-0248(02)00918-1)
59. Luo J, Kong F, Ma X. Role of aspartic acid in the synthesis of spherical vaterite by the  $\text{Ca}(\text{OH})_2\text{-CO}_2$  Reaction. *Crystal Growth & Design*. 2016;16(2):728–736. <https://doi.org/10.1021/acs.cgd.5b01333>
60. Ercole C, Cacchio P, Botta AL, Centi V, Lepidi A. Bacterially induced mineralization of calcium carbonate: The role of exopolysaccharides and capsular polysaccharides. *Microscopy and Microanalysis*. 2007;13(1):42–50. <https://doi.org/10.1017/S1431927607070122>
61. Han Z, Wang J, Zhao H, Tucker ME, Zhao Y, et al. Mechanism of biomineralization induced by *Bacillus subtilis* J2 and characteristics of the biominerals. *Minerals*. 2019;9(4):218. <https://doi.org/10.3390/min9040218>
62. Borah BM, Singh AK, Ramesh A, Das G. Lactic acid bacterial extract as a biogenic mineral growth modifier. *Journal of Crystal Growth*. 2009;311(9):2664–2672. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2009.02.015>
63. Yu H, Yan X, Weng W, Xu S, Xu G, et al. Extracellular proteins of *Desulfovibrio vulgaris* as electron shuttles and adsorbents during antimony biomineralization. *Journal of Hazardous Materials*. 2022;430:128475. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127795>
64. Zhou L, Li A, Ma F, Yang J, Pi S, et al. Sb(V) reduced to Sb(III) and more easily adsorbed in the form of  $\text{Sb}(\text{OH})_3$  by microbial extracellular polymeric substances and core-shell magnetic nanocomposites. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. 2019;7(11):10135–10145. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.9b01479>
65. Sun X, Kong T, Li F, Haggblom MM, Kolton M, et al. *Desulfurivibrio* spp. mediate sulfur-oxidation coupled to Sb(V) reduction, a novel biogeochemical process. *The ISME Journal*. 2022;16:1547–1556. <https://doi.org/10.1038/s41396-022-01201-2>
66. Zhuang F, Xiang X, Hu J, Xiong J, Zhang T, et al. Behavior and mechanisms of antimony precipitation from wastewater by sulfate-reducing bacteria *Desulfovibrio desulfuricans*. *Toxics*. 2025;13(1):17. <https://doi.org/10.3390/toxics13010017>
67. Okamoto A, Kalathil S, Deng X, Hashimoto K, Nakamura R, et al. Cell-secreted flavins bound to membrane cytochromes dictate electron transfer reactions to surfaces with diverse charge and pH. *Scientific Reports*. 2014;4:5628. <https://doi.org/10.1038/srep05628>
68. Kotloski NJ, Gralnick JA. Flavin electron shuttles dominate extracellular electron transfer by *Shewanella oneidensis*. *mBio*. 2013;4(1):e00553–12. <https://doi.org/10.1128/mbio.00553-12>
69. Clark ME, Edelman RE, Duley ML, Wall JD, Fields MW. Biofilm formation in *Desulfovibrio vulgaris* Hildenborough is dependent upon protein filaments. *Environmental Microbiology*. 2007;9(11):2844–2854. <https://doi.org/10.1111/j.1462-2920.2007.01398.x>

70. Pham CTK, Sawada K, Soda S. Characterization of a moderately halotolerant antimony-removing *Desulfovibrio* sp. strain isolated from landfill leachate. *Water*. 2023;15(22):3872. <https://doi.org/10.3390/w15223872>
71. Shi L, Dong H, Reguera G, Beyenal H, Lu A, *et al.* Extracellular electron transfer mechanisms between microorganisms and minerals. *Nature Reviews Microbiology*. 2016;14:651–662. <https://doi.org/10.1038/nrmicro.2016.93>
72. Heidelberg JF, Seshadri R, Haveman SA, Hemme CL, Paulsen IT, *et al.* The genome sequence of the anaerobic, sulfate-reducing bacterium *Desulfovibrio vulgaris* Hildenborough. *Nature Biotechnology*. 2004;22:554–559. <https://doi.org/10.1038/nbt959>
73. Liu T, Luo X, Wu Y, Reinfelder JR, Yuan X, *et al.* Extracellular electron shuttling mediated by soluble c-type cytochromes produced by *Shewanella oneidensis* MR-1. *Environmental Science & Technology*. 2020;54(17):10577–10587. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b06868>
74. Carlson HK, Iavarone AT, Gorur A, Yeo BS, Tran R, *et al.* Surface multiheme c-type cytochromes from *Thermincola potens* and implications for respiratory metal reduction by Gram-positive bacteria. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2011;109(5):1702–1707. <https://doi.org/10.1073/pnas.1112905109>
75. Dulay H, Tabares M, Kashefi K, Reguera JG. Cobalt resistance via detoxification and mineralization in the iron-reducing bacterium *Geobacter sulfurreducens*. *Frontiers in Microbiology*. 2020;11:600463. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.600463>
76. Philipp L-A, Kneuer L, Windhorst C-M, Jautelat S, LE NQ, *et al.* Identification of factors limiting the efficiency of transplanting extracellular electron transfer chains in *Escherichia coli*. *Applied and Environmental Microbiology*. 2025;91(6):e0068525. <https://doi.org/10.1128/aem.00685-25>
77. Ozbakir HF, Anderson NT, Fan KC, Mukherjee A. Beyond the green fluorescent protein: Biomolecular reporters for anaerobic and deep-tissue imaging. *Bioconjugate Chemistry*. 2020;31(2):293–302. <https://doi.org/10.1021/acs.bioconjchem.9b00688>
78. Melton ED, Swanner ED, Behrens S, Schmidt C, Kappler A. The interplay of microbially mediated and abiotic reactions in the biogeochemical Fe cycle. *Nature Reviews Microbiology*. 2014;12:797–808. <https://doi.org/10.1038/nrmicro3347>
79. Arakaki A, Yamagishi A, Fukuyo A, Tanaka M, Matsunaga T. Co-ordinated functions of Mms proteins define the surface structure of cubo-octahedral magnetite crystals in magnetotactic bacteria. *Molecular Microbiology*. 2014;93(3):554–567. <https://doi.org/10.1111/mmi.12683>
80. Yamagishi A, Tanaka M, Lenders JJM, Thiesbrummel J, Sommerdijk NAJM, *et al.* Control of magnetite nanocrystal morphology in magnetotactic bacteria by regulation of *mms7* gene expression. *Scientific Reports*. 2016;6:29785. <https://doi.org/10.1038/srep29785>
81. Li H, Yao Q-Z, Wang F-P, Huang Y-R, Fu S-Q, *et al.* Insights into the formation mechanism of vaterite mediated by a deep-sea bacterium *Shewanella piezotolerans* WP3. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2019;256:35–48. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2018.06.011>
82. Wang Y-Y, Yao Q-Z, Li H, Zhou G-T, Sheng Y-M. Formation of vaterite mesocrystals in biomineral-like structures and implication for biomineralization. *Crystal Growth & Design*. 2015;15(4):1714–1725. <https://doi.org/10.1021/cg501707f>
83. Liu F, Shah DS, Gadd GM. Role of protein in fungal biomineralization of copper carbonate nanoparticles. *Current Biology*. 2021;31(2):358–368. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2020.10.044>
84. Gilbert PUPA, Bergmann KD, Boekelheide N, Tambutté S, Mass T, *et al.* Biomineralization: Integrating mechanism and evolutionary history. *Science Advances*. 2022;8(10):eab19653. <https://doi.org/10.1126/sciadv.ab19653>
85. Lopez-Anido RN, Batzel GO, Ramirez G, Wang Y, Neal S, *et al.* The adult shell matrix protein repertoire of the marine snail *Crepidula* is dominated by conserved genes that are also expressed in larvae. *BMC Ecology and Evolution*. 2024;24:120. <https://doi.org/10.1186/s12862-024-02237-y>
86. Weiss IM, Schönlitzer V. The distribution of chitin in larval shells of the bivalve mollusk *Mytilus galloprovincialis*. *Journal of Structural Biology*. 2006;153(3):264–277. <https://doi.org/10.1016/j.jsb.2005.11.006>
87. Giuffrè AJ, Hamm LM, Han N, De Yoreo JJ, Dove PM. Polysaccharide chemistry regulates kinetics of calcite nucleation through competition of interfacial energies. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2013;110(23):9261–9266. <https://doi.org/10.1073/pnas.1222162110>
88. Debnath A, Hazra C, Sen R. Insight into biomolecular interaction-based non-classical crystallization of bacterial biocement. *Applied Microbiology and Biotechnology*. 2023;107:6683–6701. <https://doi.org/10.1007/s00253-023-12736-5>
89. Liu R, Huang S, Zhang X, Song Y, He G, *et al.* Bio-mineralisation, characterization, and stability of calcium carbonate containing organic matter. *RSC Advances*. 2021;11(24):14415–14425. <https://doi.org/10.1039/d1ra00615k>
90. Khanjani M, Westenberg DJ, Kumar A, Ma H. Tuning polymorphs and morphology of microbially induced calcium carbonate: Controlling factors and underlying mechanisms. *ACS Omega*. 2021;6(18):11988–12003. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c00559>
91. Zhuravlev YuN, Atuchin VV. Comprehensive density functional theory studies of vibrational spectra of carbonates. *Nanomaterials*. 2020;10:2275. <https://doi.org/10.3390/nano10112275>

92. Evans JS. “Tuning in” to mollusk shell nacre- and prismatic-associated protein terminal sequences. Implications for biomineralization and the construction of high performance inorganic–organic composites. *Chemical Reviews*. 2008;108(11):4455–4462. <https://doi.org/10.1021/cr078251e>
93. Arias JL, Fernández MS. Polysaccharides and proteoglycans in calcium carbonate-based biomineralization. *Chemical Reviews*. 2008;108(11):4475–4482. <https://doi.org/10.1021/cr078269p>
94. Lohße A, Borg S, Raschdorf O, Kolinko I, Tompa E, et al. Genetic dissection of the *mamAB* and *mms6* operons reveals a gene set essential for magnetosome biogenesis in *Magnetospirillum gryphiswaldense*. *Journal of Bacteriology*. 2014;196(14):2658–2669. <https://doi.org/10.1128/JB.01716-14>
95. Tanaka M, Mazuyama E, Arakaki A, Matsunaga T. MMS6 protein regulates crystal morphology during nano-sized magnetite biomineralization *in vivo*. *Journal of Biological Chemistry*. 2011;286(8):6386–6392. <https://doi.org/10.1074/jbc.M110.183434>
96. Komeili A, Li Z, Newman DK, Jensen GJ. Magnetosomes are cell membrane invaginations organized by the actin-like protein MamK. *Science*. 2006;311(5758):242–245. <https://doi.org/10.1126/science.1123231>
97. Ozyamak E, Kollman J, Agard DA, Komeili A. The Bacterial actin MamK: *In vitro* assembly behavior and filament architecture. *Journal of Biological Chemistry*. 2013;288(6):4265–4277. <https://doi.org/10.1074/jbc.M112.417030>
98. Draper O, Byrne ME, Li Z, Keyhani S, Barrozo JC, et al. MamK, a bacterial actin, forms dynamic filaments *in vivo* that are regulated by the acidic proteins MamJ and LimJ. *Molecular Microbiology*. 2011;82(2):342–354. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2958.2011.07815.x>
99. Komeili A, Vali H, Beveridge TJ, Newman DK. Magnetosome vesicles are present before magnetite formation, and MamA is required for their activation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2004;101(11):3839–3844. <https://doi.org/10.1073/pnas.0400391101>
100. Zeytuni N, Ozyamak E, Ben-Harush K, Davidov G, Levin M, et al. Self-recognition mechanism of MamA, a magnetosome-associated TPR-containing protein, promotes complex assembly. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2011;108(33):E480–E487. <https://doi.org/10.1073/pnas.1103367108>
101. Yamamoto D, Taoka A, Uchihashi T, Sasaki H, Watanabe H, et al. Visualization and structural analysis of the bacterial magnetic organelle magnetosome using atomic force microscopy. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2010;107:9382–9387. <https://doi.org/10.1073/pnas.1001870107>
102. Uebe R, Junge K, Henn V, Poxleitner G, Katzmann E, et al. The cation diffusion facilitator proteins MamB and MamM of *Magnetospirillum gryphiswaldense* have distinct and complex functions, and are involved in magnetite biomineralization and magnetosome membrane assembly. *Molecular Microbiology*. 2011;82(4):818–835. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2958.2011.07863.x>
103. Scheffel A, Gärdes A, Grünberg K, Wanner G, Schüler D. The major magnetosome proteins MamGFDC are not essential for magnetite biomineralization in *Magnetospirillum gryphiswaldense* but regulate the size of magnetosome crystals. *Journal of Bacteriology*. 2008;190(1):377–386. <https://doi.org/10.1128/JB.01371-07>
104. Valverde-Tercedor C, Montalbán-López M, Perez-Gonzalez T, Sanchez-Quesada MS, Prozorov T, et al. Size control of *in vitro* synthesized magnetite crystals by the MamC protein of *Magnetococcus marinus* strain MC-1. *Applied Microbiology and Biotechnology*. 2015;99(12):5109–5121. <https://doi.org/10.1007/s00253-014-6326-y>
105. Murat D, Quinlan A, Vali H, Komeili A. Comprehensive genetic dissection of the magnetosome gene island reveals the step-wise assembly of a prokaryotic organelle. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2010;107(12):5593–5598. <https://doi.org/10.1073/pnas.0914439107>
106. Rawlings AE, Bramble JP, Walker R, Bain J, Galloway JM, et al. Self-assembled MmsF proteinosomes control magnetite nanoparticle formation *in vitro*. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2014;111(45):16094–16099. <https://doi.org/10.1073/pnas.1409256111>
107. Lang C, Schüler D. Expression of green fluorescent protein fused to magnetosome proteins in microaerophilic magnetotactic bacteria. *Applied and Environmental Microbiology*. 2008;74(15):4944–4953. <https://doi.org/10.1128/AEM.00231-08>
108. Raschdorf O, Müller FD, Pósai M, Plitzko JM, Schüler D. The magnetosome proteins MamX, MamZ and MamH are involved in redox control of magnetite biomineralization in *Magnetospirillum gryphiswaldense*. *Molecular Microbiology*. 2013;89(5):872–886. <https://doi.org/10.1111/mmi.12317>
109. Carillo MA, Bennet M, Faivre D. Interaction of proteins associated with the magnetosome assembly in magnetotactic bacteria as revealed by two-hybrid two-photon excitation fluorescence lifetime imaging microscopy forster resonance energy transfer. *The Journal of Physical Chemistry B*. 2013;117(47):14642–14648. <https://doi.org/10.1021/jp4086987>
110. Sonkaria S, Fuentes G, Verma C, Narang R, Khare V, et al. Insight into the assembly properties and functional organisation of the magnetotactic bacterial actin-like homolog, MamK. *PLoS One*. 2012;7(5):e34189. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0034189>
111. Guo FF, Yang W, Jiang W, Geng S, Peng T, et al. Magnetosomes eliminate intracellular reactive oxygen species in *Magnetospirillum gryphiswaldense* MSR-1. *Environmental Microbiology*. 2012;14(7):1722–1729. <https://doi.org/10.1111/j.1462-2920.2012.02707.x>

112. Jones SR, Wilson TD, Brown ME, Rahn-Lee L, Yu Y, *et al.* Genetic and biochemical investigations of the role of MamP in redox control of iron biomineralization in *Magnetospirillum magneticum*. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2015;112(13):3904–3909. <https://doi.org/10.1073/pnas.1417614112>
113. Siponen MI, Adryanczyk G, Ginet N, Arnoux P, Pignol D. Magnetochrome: a c-type cytochrome domain specific to magnetotactic bacteria. *Biochemical Society Transactions*. 2012;40:1319–1323. <https://doi.org/10.1042/BST20120104>
114. Tanaka M, Okamura Y, Arakaki A, Tanaka T, Takeyama H, *et al.* Origin of magnetosome membrane: Proteomic analysis of magnetosome membrane and comparison with cytoplasmic membrane. *Proteomics*. 2006;6(19):5234–5237. <https://doi.org/10.1002/pmic.200500887>
115. Ding Y, Li J, Liu J, Yang J, Jiang W, *et al.* Deletion of the *ftsZ*-like gene results in the production of superparamagnetic magnetite magnetosomes in *Magnetospirillum gryphiswaldense*. *Journal of Bacteriology*. 2010;192(4):1097–1105. <https://doi.org/10.1128/JB.01292-09>
116. Amemiya Y, Arakaki A, Staniland SS, Tanaka T, Matsunaga T. Controlled formation of magnetite crystal by partial oxidation of ferrous hydroxide in the presence of recombinant magnetotactic bacterial protein Mms6. *Biomaterials*. 2007;28(35):5381–5389. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2007.07.051>
117. Murat D, Falahati V, Bertinetti L, Csencsits R, Körnig A, *et al.* The magnetosome membrane protein, MmsF, is a major regulator of magnetite biomineralization in *Magnetospirillum magneticum* AMB-1. *Molecular Microbiology*. 2012;85(4):684–699. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2958.2012.08132.x>
118. Hershey DM, Ren X, Melnyk RA, Browne PJ, Ozyamak E, *et al.* MamO is a repurposed serine protease that promotes magnetite biomineralization through direct transition metal binding in magnetotactic bacteria. *PLOS Biology*. 2016;14(3):e1002402. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.1002402>
119. Uebe R, Schüler D. Magnetosome biogenesis in magnetotactic bacteria. *Nature Reviews Microbiology*. 2016;14:621–637. <https://doi.org/10.1038/nrmicro.2016.99>
120. Li Y. Redox control of magnetosome biomineralization. *Journal of Oceanology and Limnology*. 2021;39:2070–2081. <https://doi.org/10.1007/s00343-021-0422-5>
121. Siponen MI, Legrand P, Widdrat M, Jones SR, Zhang WJ, *et al.* Structural insight into magnetochrome-mediated magnetite biomineralization. *Nature*. 2013;502:681–684. <https://doi.org/10.1038/nature12573>
122. Nudelman H, Lee YZ, Hung YL, Kolusheva S, Upcher A, *et al.* Understanding the biomineralization role of magnetite-interacting components (MICs) from magnetotactic bacteria. *Frontiers in Microbiology*. 2018;9:2480. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.02480>
123. Raschdorf O, Bonn F, Zeytuni N, Zarivach R, Becher D, *et al.* A quantitative assessment of the membrane-integral sub-proteome of a bacterial magnetic organelle. *Journal of Proteomics*. 2018;172:89–99. <https://doi.org/10.1016/j.jprot.2017.10.007>
124. Staniland SS, Rawlings AE. Crystallizing the function of the magnetosome membrane mineralization protein Mms6. *Biochemical Society Transactions*. 2016;44(3):883–890. <https://doi.org/10.1042/BST20160057>
125. Müller FD, Schüler D, Pfeiffer D. A compass to boost navigation: Cell biology of bacterial magnetotaxis. *Journal of Bacteriology*. 2020;202(21):e00398–20. <https://doi.org/10.1128/JB.00398-20>
126. Urquidi O, Brazard J, LeMessurier N, Simine L, Adachi TBM. *In situ* optical spectroscopy of crystallization: One crystal nucleation at a time. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2022;119(16):e2122990119. <https://doi.org/10.1073/pnas.2122990119>
127. Zhang F, Min H, Zhang Y, Kuang Z, Wang J, *et al.* Vapor-assisted in situ recrystallization for efficient tin-based perovskite light-emitting diodes. *Advanced Materials*. 2022;34(37):e2203180. <https://doi.org/10.1002/adma.202203180>
128. Liu Y, Zou G, She J, Deng B, Yang H. Nanoscale physical parameters of source rocks identified by atomic force microscopy: A review. *Geological Journal*. 2022;57(10):4345–4356. <https://doi.org/10.1002/gj.4548>
129. Kosareva EK, Pivkina AN, Muravyev NV. Atomic force microscopy in energetic materials research: A review. *Energetic Materials Frontiers*. 2022;3(4):290–302. <https://doi.org/10.1016/j.enmf.2022.05.004>
130. Gebauer D, Gale JD, Cölfen H. Crystal nucleation and growth of inorganic ionic materials from aqueous solution: Selected recent developments, and implications. *Small*. 2022;18(28):2107735. <https://doi.org/10.1002/smll.202107735>
131. Gavezzotti A, Presti LL, Rizzato S. Molecular dynamics simulation of organic materials: Structure, potentials and the MiCMoS computer platform. *CrystEngComm*. 2022;5:922–930. <https://doi.org/10.1039/D1CE01360B>
132. Lüttig J, Mueller S, Malý P, Krich JJ, Brixner T. Higher-order multidimensional and pump–probe spectroscopies. *The Journal of Physical Chemistry Letters*. 2023;14(33):7556–7573. <https://doi.org/10.1021/acs.jpclett.3c01694>
133. Tikhonov DS, Blech A, Leibscher M, Greenman L, Schnell M, *et al.* Pump-probe spectroscopy of chiral vibrational dynamics. *Science Advances*. 2022;8(49):eade0311. <https://doi.org/10.1126/sciadv.ade0311>
134. Ueda K, Yamamoto N, Higashi K, Moribe K. NMR-based mechanistic study of crystal nucleation inhibition in a supersaturated drug solution by polyvinylpyrrolidone. *Crystal Growth and Design*. 2022;22(5):3235–3244. <https://doi.org/10.1021/acs.cgd.2c00084>



135. Carpenter B, Talosig A, Rose B, Palma GD, Patterson J. Understanding and controlling the nucleation and growth of metal-organic frameworks. *Chemical Society Reviews*. 2023;52:6918–6937. <https://doi.org/10.1039/D3CS00312D>
136. Wang J, Wang X, Xu D. Machine learning insights into calcium phosphate nucleation and aggregation. *Acta Biomaterialia*. 2025;195:547–558. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2025.02.036>
137. Mannucci S, Tambalo S, Conti G, Ghin L, Milanese A, et al. Magnetosomes extracted from *Magnetospirillum gryphiswaldense* as theranostic agents in an experimental model of glioblastoma. *Contrast Media & Molecular Imaging*. 2018;2018:2198703. <https://doi.org/10.1155/2018/2198703>
138. Wang X, Wang JG, Geng YY, Wang JJ, Zhang XM, et al. An enhanced anti-tumor effect of apoptin-cccropin B on human hepatoma cells by using bacterial magnetic particle gene delivery system. *Biochemical and Biophysical Research Communications*. 2018;496(2):719–725. <https://doi.org/10.1016/j.bbrc.2018.01.108>
139. Xiang Z, Yang X, Xu J, Lai W, Wang Z, et al. Tumor detection using magnetosome nanoparticles functionalized with a newly screened EGFR/HER2 targeting peptide. *Biomaterials*. 2017;115:53–64. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2016.11.022>
140. Song N, Li Q, Zhou Y, Sun G, Pan L, et al. Carbonate biomineralization differentially induced by two psychrophilic *Pseudomonas psychrophila* strains isolated from an alpine travertine landform. *RSC Advances*. 2021;11(21):12885–12892. <https://doi.org/10.1039/d1ra00578b>
141. Nadeem M, Khan R, Shah N, Bangash IR, Abbasi BH, et al. A review of microbial mediated iron nanoparticles (IONPs) and its biomedical applications. *Nanomaterials*. 2022;12(1):130. <https://doi.org/10.3390/nano12010130>
142. Gandarias L, Kimber RL, Ona-Nguema G. Environmental, biomedical, and industrial applications of biogenic magnetite nanoparticles. *Elements*. 2023;19(4):228–233. <https://doi.org/10.2138/gselements.19.4.228>
143. Dudchenko N, Pawar S, Perelshtein I, Fixler D. Magnetite-based biosensors and molecular logic gates: From magnetite synthesis to application. *Biosensors*. 2023;13(3):304. <https://doi.org/10.3390/bios13030304>
144. Kurczewska J, Dobosz B. Recent progress and challenges regarding magnetite-based nanoparticles for targeted drug delivery. *Applied Sciences*. 2024;14(3):1132. <https://doi.org/10.3390/app14031132>
145. Kotakadi SM, Borelli DPR, Nannepaga JS. Therapeutic applications of magnetotactic bacteria and magnetosomes: A review emphasizing on the cancer treatment. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. 2022;10:789016. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2022.789016>
146. Ren G, Zhou X, Long R, Xie M, Kankala RK, et al. Biomedical applications of magnetosomes: State of the art and perspectives. *Bioactive Materials*. 2023;28:27–49. <https://doi.org/10.1016/j.bioactmat.2023.04.025>
147. Mittmann E, Mickoleit F, Maier DS, Stäbler SY, Klein MA, et al. A magnetosome-based platform for flow biocatalysis. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2022;14(19):22138–22150. <https://doi.org/10.1021/acsami.2c03337>
148. Smit BA, Zy EV, Joubert JJ, Meyer W, Prévéral S, et al. Magnetotactic bacteria used to generate electricity based on Faraday's law of electromagnetic induction. *Letters in Applied Microbiology*. 2018;66(5):362–367. <https://doi.org/10.1111/lam.12862>
149. Shen J, Paterson GA, Wang Y, Kirschvink JL, Pan Y, et al. Renaissance for magnetotactic bacteria in astrobiology. *The ISME Journal*. 2023;17(10):1526–1534. <https://doi.org/10.1038/s41396-023-01495-w>
150. Fadia P, Tyagi S, Bhagat S, Nair A, Panchal P, et al. Calcium carbonate nano- and microparticles: Synthesis methods and biological applications. *3 Biotech*. 2021;11(11):457. <https://doi.org/10.1007/s13205-021-02995-2>
151. Nasser AA, Sorour NM, Saafan MA, Abbas RN. Microbially-Induced-Calcite-Precipitation (MICP): A biotechnological approach to enhance the durability of concrete using *Bacillus pasteurii* and *Bacillus sphaericus*. *Heliyon*. 2022;8(7):e09879. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09879>
152. Wang Y, Konstantinou C, Tang S, Chen H. Applications of microbial-induced carbonate precipitation: A state-of-the-art review. *Biogeotechnics*. 2023;1(1):100008. <https://doi.org/10.1016/j.bgtech.2023.100008>
153. Wang Z, Su J, Ali A, Gao Z, Zhang R, et al. Microbially induced calcium precipitation driven by denitrification: Performance, metabolites, and molecular mechanisms. *The Journal of Environmental Management*. 2023;338:117826. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117826>
154. Колпакова Д. Е., Серазетдинова Ю. Р., Фотина Н. В., Заушинцева А. В., Асякина Л. К. и др. Микробная биофортификация злаковых культур: перспективы и текущее развитие. *Техника и технология пищевых производств*. 2024. Т. 54. № 2. С. 191–211. [Kolpakova DE, Serazetdinova YuR, Fotina NV, Zaushintsena AV, Asyakina LK, et al. Microbial bio-fortification of grain crops: Current state and prospects. *Food Processing: Techniques and Technology*. 2024;54(2):191–211. (In Russ.)] <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-2-2500>.
155. Асякина Л. К., Дышлюк Л. С., Просеков А. Ю. Мировой опыт в области рекультивации посттехногенных ландшафтов. *Техника и технология пищевых производств*. 2021. Т. 51. № 4. С. 805–818. [Asyakina LK, Dyshlyuk LS, Prosekov AYU. Reclamation of post-technological landscapes: International experience. *Food Processing: Techniques and Technology*. 2021;51(4):805–818. (In Russ.)] <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-4-805-818>
156. Tiano P, Cantisani E, Sutherland I, Paget JM. Biomediated reinforcement of weathered calcareous stones. *Journal of Cultural Heritage*. 2006;7(1):49–55. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2005.10.003>

157. Barabesi C, Galizzi A, Mastromei G, Rossi M, Tamburini E, *et al.* *Bacillus subtilis* gene cluster involved in calcium carbonate biomineralization. *Journal of Bacteriology*. 2007;189(1):228–235. <https://doi.org/10.1128/JB.01450-06>
158. Jroundi F, Gómez-Suaga P, Jimenez-Lopez C, González-Muñoz MT, Fernandez-Vivas MA. Stone-isolated carbonatogenic bacteria as inoculants in bioconsolidation treatments for historical limestone. *Science of the Total Environment*. 2012;425:89–98. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.02.059>
159. Jroundi F, Gonzalez-Muñoz MT, Sterflinger K, Piñar G. Molecular tools for monitoring the ecological sustainability of a stone bio-consolidation treatment at the Royal chapel, Granada. *PLOS One*. 2015;10(7):e0132465. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0132465>
160. Jroundi F, Schiro M, Ruiz-Agudo E, Elert K, Martín-Sánchez I, *et al.* Protection and consolidation of stone heritage by self-inoculation with indigenous carbonatogenic bacterial communities. *Nature Communications*. 2017;8:279. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-00372-3>
161. Yoosathaporn S, Tiangburanatham P, Bovonsombut S, Chaipanich A, Pathom-Aree W. A cost effective cultivation medium for biocalcification of *Bacillus pasteurii* KCTC 3558 and its effect on cement cubes properties. *Microbiological Research*. 2016;186–187:132–138. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2016.03.01>
162. Rodriguez-Navarro C, Jroundi F, Schiro M, Ruiz-Agudo E, González-Muñoz MT. Influence of substrate mineralogy on bacterial mineralization of calcium carbonate: Implications for stone conservation. *Applied and Environmental Microbiology*. 2012;78(11):4017–4029. <https://doi.org/10.1128/AEM.07044-11>
163. Jroundi F, Fernández-Vivas A, Rodriguez-Navarro C, Bedmar EJ, González-Muñoz MT. Bioconservation of deteriorated monumental calcarenite stone and identification of bacteria with carbonatogenic activity. *Microbial Ecology*. 2010;60:39–54. <https://doi.org/10.1007/s00248-010-9665-y>

#### Дополнительная информация об авторах / Additional information about the authors

Бородина Екатерина Евгеньевна / Ekaterina E. Borodina ORCID 0000-0001-6362-7589; eLIBRARY SPIN 9708-9200  
Колпакова Дарья Евгеньевна / Daria E. Kolpakova ORCID 0000-0002-8508-3372; eLIBRARY SPIN 5576-4258  
Гордиенко Андрей Владимирович / Andrey V. Gordiyenko eLIBRARY SPIN 4209-7793  
Плешивцев Иван Игоревич / Ivan I. Pleshivtsev ORCID 0009-0006-4085-4045; eLIBRARY SPIN 5774-4748  
Карчин Константин Валерьевич / Konstantin V. Karchin eLIBRARY SPIN 5466-2670

<https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-3-2659>  
<https://elibrary.ru/MDKVCX>

Обзорная статья  
<https://fptt.ru>

## Жир из рыбного сырья в технологии колбасных изделий: перспективы и проблемы использования



А. Ю. Глухарев\*<sup>ID</sup>, В. И. Волченко<sup>ID</sup>,  
В. А. Гроховский<sup>ID</sup>, Д. С. Колотова<sup>ID</sup>

Мурманский арктический университет<sup>ROR</sup>, Мурманск, Россия

Поступила в редакцию: 10.05.2026  
Принята после рецензирования: 28.08.2026  
Принята к публикации: 01.09.2026

\*e-mail: [glukharevayu@yandex.ru](mailto:glukharevayu@yandex.ru)  
© А. Ю. Глухарев, В. И. Волченко, В. А. Гроховский,  
Д. С. Колотова, 2026



### Аннотация.

Рыбный жир – уникальный источник ценных биологически активных соединений: полиненасыщенных жирных кислот группы омега-3 и жирорастворимых витаминов, необходимых для нормального функционирования организма человека. Его применение в технологии колбасных изделий взамен жиров наземных животных и птиц позволяет повысить пищевую и биологическую ценность жировой фракции продукта, а также расширить ассортимент функциональных и обогащенных продуктов питания. Цель исследования – проанализировать и систематизировать научные данные о существующих методах улучшения жирнокислотного состава колбасных изделий за счет использования рыбного жира и рыбного жирового сырья, а также рассмотреть дальнейшие перспективы и оценить влияние получаемой продукции на здоровье и благополучие человека.

Объекты исследования – научные публикации, посвященные изучению химического состава рыбного жира, биоактивных свойств его компонентов и практическому применению в колбасных изделиях. Поиск литературных источников проводили по ключевым словам с использованием библиографических баз данных ScienceDirect, PubMed, Springer Link и eLIBRARY.RU.

Установлено, что потребление в пищу колбасных изделий, приготовленных по традиционным технологиям, может быть связано с потенциальным риском для здоровья организма человека из-за высокого содержания в них насыщенных жирных кислот и холестерина, которые повышают вероятность развития сердечно-сосудистых заболеваний и ожирения. Использование в рецептуре колбас рыбного жира или его комбинации с растительными маслами позволяет уменьшить содержание насыщенных жиров и сформировать сбалансированный жирнокислотный состав с высоким содержанием эссенциальных омега-3 полиненасыщенных жирных кислот. В результате может быть решена проблема корректировки и улучшения липидного компонента колбас. Тем не менее в ряде случаев такая замена требует дополнительных действий по стабилизации жира к окислению, вкусоароматических характеристик, а также консистенции готового продукта.

Полученная продукция может быть использована различными группами населения как замена традиционным колбасным изделиям в рационе, что обеспечит достижение ряда положительных эффектов для здоровья потребителей, в т. ч. снизит риск сердечно-сосудистых заболеваний иотрегулирует липидный обмен.

**Ключевые слова.** Рыбный жир, мясные продукты, колбасные изделия, полиненасыщенные жирные кислоты, пищевая ценность, качество продукта

**Финансирование.** Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 25-26-00792.

**Для цитирования:** Глухарев А. Ю., Волченко В. И., Гроховский В. А., Колотова Д. С. Жир из рыбного сырья в технологии колбасных изделий: перспективы и проблемы использования. Техника и технология пищевых производств. 2026. Т. 56. № 3. С. 584–609. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-3-2659>

## Fish-Based Oil in Sausage Production Technology: Prospects and Challenges



Andrei Yu. Glukharev\*<sup>ID</sup>, Vasily I. Volchenko<sup>ID</sup>,  
Vladimir A. Grokhovsky<sup>ID</sup>, Daria S. Kolotova<sup>ID</sup>

Murmansk Arctic University<sup>ROR</sup>, Murmansk, Russia

Received: 10.05.2026  
Revised: 28.08.2026  
Accepted: 01.09.2026

\*e-mail: [glukharevayu@yandex.ru](mailto:glukharevayu@yandex.ru)  
© A.Yu. Glukharev, V.I. Volchenko, V.A. Grokhovsky, D.S. Kolotova, 2026



### Abstract.

Fish oil provides valuable natural compounds, such as omega-3 polyunsaturated fatty acids and fat-soluble vitamins, which are essential for human health. Its use in sausage production as a substitute for animal and poultry fats improves the nutritional and biological value of the fat fraction, thereby expanding the range of functional and therapeutic products. This review examines scientific literature on the use of fish oil to improve the nutritional value and biological efficacy of sausage fats, while also assessing the prospects and impact of the finished products on human health.

The review covers scientific publications on the chemical composition of fish oil, the bioactive properties of its components, and its practical application in sausage products, indexed in ScienceDirect, PubMed, Springer Link, and eLIBRARY.RU.

Traditional sausage products are often associated with potential health risks due to their high content of saturated fatty acids and cholesterol, which increase the risk of cardiovascular diseases and obesity. Adding fish oil to sausage formulations, alone or with vegetable oils, can reduce the saturated fat content in the finished product by shifting the fatty acid profile toward a higher proportion of unsaturated fats. Fish oil is an effective means of adjusting and improving the fat composition of sausages. However, in some cases, this substitution requires additional measures to stabilize the fat against oxidation, preserve the sensory profile, and maintain the consistency of the finished product.

Sausages containing fish oil serve as a dietary substitute for traditional sausage products, as they reduce the risk of cardiovascular diseases and help regulate lipid metabolism.

**Keywords.** Fish oil, meat products, sausages, polyunsaturated fatty acids, nutritional value, product quality

**Funding.** The work was supported by the Russian Science Foundation, project No. 25-26-00792.

**For citation:** Glukharev AYu, Volchenko VI, Grokhovsky VA, Kolotova DS. Fish-Based Oil in Sausage Production Technology: Prospects and Challenges. Food Processing: Techniques and Technology. 2026;56(3):584–609. (In Russ.) <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-3-2659>

### Введение

Мясная промышленность – ключевой сектор мировой и отечественной экономики, одна из важнейших отраслей пищевой промышленности. Мясные продукты пользуются постоянным спросом у населения за счет выраженных органолептических характеристик (хороший внешний вид, красивый цвет, приятный аромат и вкус), отвечающих потребительским предпочтениям, и высоко ценятся как источник животных белков и жиров, а также легкоусвояемых форм минеральных веществ (железо, цинк, фосфор, селен) и витаминов группы В (В<sub>1</sub>, В<sub>2</sub>, В<sub>3</sub>, В<sub>12</sub>). В то же время изменение традиционных рецептов – как в сторону снижения потенциально вредных компонентов, так и в сторону обогащения функциональными ингредиентами – позволяет существенно повысить биологическую ценность готовых изделий [1, 2]. Однако реализация данного подхода требует направленной оптимизации состава

для сохранения привычных физико-химических и органолептических показателей продукции в соответствии с актуальными запросами рынка [3]. В связи с этим использование нетрадиционных видов сырья и пищевых ингредиентов с функциональной активностью, равно как и применение особых биотехнологических приемов, представляется важным фактором при создании современных мясных продуктов для здорового питания – таких, которые не только удовлетворяют потребности организма в основных питательных веществах, но и оказывают позитивное влияние на функционирование органов и тканей [4–6]. Подобного рода продукты приобретают особое значение на фоне наблюдаемого дефицита незаменимых микронутриентов в рационе питания населения России и некоторых западных стран [7–14].

Колбасные изделия относятся к ценным высокопитательным продуктам питания, которые готовятся



из смеси различных видов мяса с добавлением жира, белковых препаратов, нитритно-посолочной смеси, пряностей и других пищевых ингредиентов и добавок, помещенных в натуральную или искусственную колбасную оболочку. В настоящее время мясные изделия, в частности колбасы и мясные полуфабрикаты, составляют важную часть рациона и играют значительную роль в структуре питания населения многих стран мира, включая Россию [15, 16]. Ускоренная урбанизация и действующие социально-экономические факторы поддерживают высокий спрос на мясо и переработанную мясную продукцию [17, 18]. Согласно последним статистическим и экономическим оценкам, среднечеловеческое потребление мяса и мясопродуктов в России демонстрирует стабильный рост, достигнув значений свыше 80 кг на человека в год, что существенно превышает рекомендованные медицинские нормы [16, 19, 20]. При этом совокупный объем производства колбасных изделий в России стабильно удерживается на уровне 2,5 млн т ежегодно [21]. Следовательно, готовые продукты становятся неотъемлемой частью повседневной жизни, и изделия на основе мясного фарша (колбасы) идеально встраиваются в эту модель.

Большое значение при производстве колбас имеют жиры наземных животных и птиц, поскольку они определяют питательную ценность, консистенцию и вкус готового продукта благодаря своему химическому составу, а также кулинарным и физико-химическим свойствам. При этом проблема несбалансированного питания на фоне высокого уровня употребления колбасных изделий сопряжена с повышенным риском возникновения сердечно-сосудистых заболеваний и различных нарушений обмена веществ (диабет, избыточная масса тела, ожирение). Это связано с тем, что колбасы содержат большое количество насыщенных жиров, которые при избыточном поступлении в организм повышают уровень холестерина липопротеинов низкой плотности в крови [22]. Кроме того, в жирах наземных животных соотношения полиненасыщенных и насыщенных жирных кислот (ПНЖК и НЖК соответственно), а также омега-6 и омега-3 ПНЖК не соответствуют рекомендуемым значениям. Перспективным решением этой проблемы может стать целенаправленное обогащение состава корма сельскохозяйственных животных источниками ненасыщенных жирных кислот, что позволяет напрямую корректировать жирнокислотный состав липидов тканей животных еще на этапе выращивания [23].

Рыбные жиры<sup>1</sup>, получаемые из рыбного сырья, отличаются высокой биологической ценностью и служат

источником уникальных функциональных пищевых ингредиентов – омега-3 ПНЖК, а также жирорастворимых витаминов (А, Е и D), которые при регулярном употреблении оказывают терапевтический эффект [24, 25]. Благодаря такому составу эти жиры способствуют снижению риска развития ряда заболеваний, таких как сердечно-сосудистые заболевания, диабет, психические расстройства, поражения почек, ожирение, болезни костей и тяжелые воспаления [26–28]. Умеренное потребление жирных видов рыб и продуктов, изготовленных с применением рыбных жиров, соответствует современным принципам здорового питания и носит профилактический характер.

Введение рыбного жирового сырья или рыбного жира в рецептуры колбасных изделий в качестве частичной замены свиного шпика и других животных жиров позволит увеличить содержание в продукте омега-3 ПНЖК и тем самым скорректировать его липидный состав. Кроме того, колбасные изделия, полученные таким образом, могут сделать потребление рыбного жира более доступным в тех случаях, когда по определенным причинам существуют проблемы или ограничения с приемом капсул. Поэтому снижение доли животных жиров или их частичная замена в рецептуре колбас особо актуальна.

Изменение липидной фракции мясопродуктов основано на рекомендациях учреждений здравоохранения относительно потребления ПНЖК в целях улучшения здоровья [29, 30]. В частности, согласно действующим в Российской Федерации нормам физиологических потребностей, адекватный уровень суточного потребления длинноцепочечных омега-3 ПНЖК (суммарно эйкозапентаеновой (ЭПК) и докозагексаеновой (ДГК) кислот) для детей от 3 до 17 лет и взрослого населения составляет 250 мг (0,25 г). В то же время для детей до 2 лет суточная потребность в ДГК в рационе составляет 100 мг [31, 32]. Создание новых колбасных изделий с рыбным жиром позволит не только оптимизировать жировую фракцию продукта, но и обогатить ее витаминами, что приобретает особую актуальность в связи с дефицитом этих нутриентов, отмечаемым более чем у 60 % взрослых россиян. Данная научная стратегия способна расширить ассортимент продуктов специализированного, лечебно-профилактического и функционального питания.

Отдельного рассмотрения требует вопрос сохранения данных веществ в готовом продукте, т. к. известно, что тепловая обработка разрушает отдельные витамины, а также усиливает окисление и гидролиз жира [33]. Помимо этого, рыбный жир обладает характерным ароматом и вкусом, которые могут вызывать нежелательные изменения в органолептических и потребительских свойствах продукта. В связи с этим возрастает интерес к технологиям, позволяющим стабилизировать биоактивные вещества для сохранения их функциональных свойств на всех этапах создания, переработки и хранения продукции.

<sup>1</sup> В научной литературе также используется термин «рыбий жир» – фармакологическое название медицинского жира, выделяемого из печени рыб. Принимая во внимание данный факт, отметим, что в настоящей работе рассмотрен жир из рыбного сырья в целом как пищевой продукт или ингредиент в составе пищевого продукта. Поэтому для обеспечения точности восприятия и единообразия терминологии в тексте всей статьи использован термин «рыбный жир».

Таким образом, имеющиеся научные данные могут помочь исследователям и технологам пищевой промышленности в разработке новых мясных продуктов, способных оказывать положительное влияние на здоровье человека. Цель исследования – проанализировать и систематизировать научные данные о существующих методах улучшения жирнокислотного состава колбасных изделий за счет использования рыбного жира и рыбного жирового сырья, а также рассмотреть дальнейшие перспективы и оценить влияние получаемой продукции на здоровье и благополучие человека.

### **Объекты и методы исследования**

Объектами исследования являлись научные публикации, посвященные изучению химического состава рыбного жира, методов его получения, биоактивных свойств содержащихся в нем веществ, а также его практическому применению в колбасных изделиях.

В соответствии с обозначенной целью в работе поставлены следующие задачи:

1. Осуществить поиск и отбор литературы.
2. Изучить, систематизировать и проанализировать данные о химическом составе и пищевой ценности рыбного жира, способах и методах его использования в технологии колбасных изделий, а также о влиянии данного ингредиента на качество готового продукта.
3. Обобщить полученные результаты и сформулировать заключение.

Отбор и систематизация научной литературы по теме исследования выполнены в соответствии с методикой, предложенной Н. Snyder [34] и R. G. Torracco [35]. Первоначально найденные материалы, соответствующие тематике исследования, проанализированы на предмет непротиворечивости, актуальности и соответствия цели работы, после чего отобранные материалы обобщены, систематизированы и представлены в дальнейших разделах обзора; на их основе сформулированы заключительные выводы.

Поиск литературы по теме работы проводили с использованием информационно-поисковых систем: Google, Yandex и Google Scholar, а также баз данных – Scopus и Web of Science, по ключевым словам и словосочетаниям: дефицит питательных веществ, рыбный жир, мясные продукты, колбасные изделия, полиненасыщенные жирные кислоты, омега-3, пищевая ценность, биологическая активность, качество продукта. Для поиска использованы общедоступные научные электронные библиотеки и информационные ресурсы, содержащие широкий спектр статей, журналов, книг и других материалов: eLIBRARY.RU, ScienceDirect, PubMed, MDPI и Springer Link.

Наряду с источниками, подготовленными другими авторами, в работе использовались публикации авторов настоящей статьи по рассматриваемой проблематике. В качестве материала использованы следующие типы публикаций: Article, Review, Conference Paper, Chapter. Временной интервал для отбора статей ограничен

1980–2026 гг. Выбор начальной точки обусловлен тем, что именно с 1980-х гг. в мясной индустрии начались систематические исследования по корректировке рецептур для снижения доли насыщенных жиров и поиску альтернативных источников липидов [36]. Анализ указанного периода позволяет проследить эволюцию технологических подходов – от прямой замены жиров наземных животных рыбными жирами до современных высокотехнологичных методов микрокапсулирования липидных систем. При этом особый акцент сделан на наиболее актуальных исследованиях последних лет.

Исследования выполнены на базе научно-исследовательской лаборатории «Химия и технология морских биоресурсов» (проект «Наука и университеты») и на кафедре технологий пищевых производств ФГАОУ ВО «Мурманский арктический университет» (Мурманск, Россия).

### **Результаты и их обсуждение**

Рыбная промышленность занимает особое место в экономике многих стран мира. Водные биоресурсы служат основными источниками для получения разнообразных пищевых продуктов и широкого спектра биологически активных веществ, в т. ч. выделяемых из объектов вторичной переработки, которые, в свою очередь, используются для получения ряда лечебных, кормовых и технических продуктов [37, 38].

В составе рыбного сырья содержится значительное количество различных химических соединений, среди которых особый интерес представляют липиды с высокой биологической ценностью [24, 39]. Данные вещества являются ценными пищевыми ингредиентами и могут использоваться для создания продуктов питания, обогащенных биоактивными соединениями, способствующими улучшению здоровья человека и решению проблем, связанных с ростом ряда алиментарно-зависимых заболеваний.

**Рыбный жир: характеристика и объекты выделения.** Жиры рыб – это липидная фракция, выделяемая из жиросодержащего рыбного сырья, представляющая собой густоватую прозрачную маслянистую жидкость со светло-желтым или янтарным оттенком, обладающая характерным запахом и вкусом. Высокая биологическая ценность липидной продукции, получаемой из гидробионтов, обусловлена их уникальным жирнокислотным составом: значительным содержанием полиненасыщенных жирных кислот (ПНЖК) семейства омега-3 (особенно эйкозапентаеновой (ЭПК), докозагексаеновой (ДГК) и  $\alpha$ -линоленовой кислот), а также присутствием витаминов А, Д и Е, что служит основной причиной их благоприятного воздействия при ряде заболеваний, а также обеспечивает нормальное развитие и адаптацию организма человека к неблагоприятным факторам окружающей среды [40–42].

В совокупности жирные кислоты состоят из углеводородных цепей с карбоксильной ( $-\text{COOH}$ ) и метильной ( $-\text{CH}_3$ ) группами на концах. Они различаются по длине

цепи, степени насыщенности и положению двойных связей. Природные жирные кислоты, не подвергавшиеся порче или искусственной модификации, имеют строго линейную структуру молекулы, не содержат сопряженных или алленовых двойных связей; при этом относительно каждой двойной связи такая молекула находится в цис-конфигурации (природные транс-изомеры встречаются в очень малых количествах). Также в природе преобладают жирные кислоты с четным числом углеродных атомов, кислоты с нечетным числом атомов присутствуют в микроколичествах, однако выполняют важные физиологические функции. Омега-3 жирные кислоты содержат двойную углерод-углеродную связь, следующую за третьим атомом углерода со стороны метильного конца [43]. Полярные и гидрофобные группы, входящие в структуру липидов, обуславливают их участие в формировании биологических мембран, переносе веществ через них, энергообеспечении клетки и защитных реакциях организма. Жирные кислоты с двойными связями способны нормализовать липидный обмен в организме животных и человека.

Основным пищевым источником омега-3 жирных кислот служат жирные виды рыб и некоторые морепродукты, кроме того, они содержатся в ряде растительных масел (льняном, из семян крестоцветных, соевом). Россия обладает высоким потенциалом для производства рыбного жира. В качестве источников сырья могут использоваться океанические и морские виды рыб с высокой жирностью, такие как тихоокеанская и атлантическая сельдь, скумбрия, дальневосточная сардина (иваси), сайра, а также аквакультурные лососевые рыбы [44–48]. Помимо этого, в качестве жиросодержащего сырья при производстве рыбного жира часто используют печень некоторых видов рыб (трески баренцевоморской, атлантической и балтийской, пикши, путассу северной, макруруса тупорылого), жир внутренних органов, туловищные жиры рыб, включая покровное сало морских млекопитающих. Печень, отделяемую при разделке тресковых видов рыб, также направляют на производство стерилизованной рыбной продукции. Из отобранного печеночного сырья вырабатывают жир, пользующийся высоким спросом и широко применяемый для производства медицинских препаратов, биологически активных добавок к пище, функциональных и обогащенных пищевых продуктов, а также кормовых добавок [49, 50]. Для непосредственного обогащения колбасных изделий наиболее целесообразно использовать очищенные туловищные жиры морских рыб. Однако прямое введение рыбных жиров в мясные эмульсии сопряжено с технологическими рисками, что обуславливает необходимость применения специальных методов их стабилизации и физической модификации, подробно рассматриваемых далее.

В последние годы особое внимание привлекают рыбы пониженной товарной ценности, вторичное рыбное сырье и пресноводные рыбы – альтернатив-

ные источники сырья для получения липидной продукции [51–53]. Среди пресноводных объектов России в этом отношении определенный интерес представляют толстолобик и сом [54, 55]. Их использование может стать одним из возможных подходов в удовлетворении высокого спроса и устойчивом обеспечении населения ПНЖК омега-3 и жирорастворимыми витаминами в связи с чрезмерной эксплуатацией и сокращением численности традиционных промысловых видов рыб. Таким образом, жиросодержащее рыбное сырье представляет собой важный источник рыбного жира, который следует извлекать и использовать с учетом его состава, качественных характеристик и показателей безопасности.

**Методы выделения рыбного жира.** Качество рыбного жира напрямую зависит от двух основных факторов – свежести рыбного жирового сырья и технологии извлечения из него жира. В зависимости от технологических условий на качество жирового продукта могут воздействовать высокие температуры и контакт с кислородом воздуха, а также используемые реагенты (вода, ферменты, органические кислоты) [56].

Процесс выделения жира из тканей и внутренних органов (в т. ч. печени) гидробионтов включает разрушение их структуры методами нагрева (вытапливания), замораживания, экстракции или механического воздействия (гидравлического прессования, сепарирования или центрифугирования). Также жир выделяют с помощью механического (гидромеханического) импульса и электроимпульса. В дальнейшем жир-сырец направляют на очистку и фильтрацию, а при необходимости – на витаминизацию. К новым методам относятся экстракция сверхкритическими флюидами [57], ферментативная экстракция [58], экстракция с помощью микроволнового (сверхвысокочастотного) излучения и экстракция с помощью ультразвука [59].

**Химический состав рыбного жира.** Гидробионты отличаются особым химическим составом. К основным соединениям, образующим ткани и органы рыб, относятся липиды, в т. ч. хорошо усвояемые жиры. Фракционный состав липидов мышечной ткани гидробионтов варьируется в широких пределах в зависимости от жирности рыб (тощие, средней жирности, жирные), их возраста, ареала обитания и сезона вылова. Обобщенный анализ основных семейств промысловых океанических, морских и пресноводных рыб показывает, что в общем количестве выделенных липидов содержится: 1,5–13,6 % (от общего количества липидов) фосфолипидов; 18,5–67,1 % триглицеридов высших жирных кислот; 2,5–19,4 % диглицеридов; 1,6–6,6 % моноглицеридов; до 16 % стерина и восков; до 13 % углеводов [60]. При этом в мясе тощих видов рыб (например тресковых) основную массу липидов составляют фосфолипиды. У жирных видов рыб (например скумбрии), а также в печени рыб (минтая, трески, северной путассу) преобладают триглицериды, за исключением кеты [61–63].



Содержание отдельных жирных кислот в липидах рыб также непостоянно. Липиды гидробионтов включают насыщенные жирные кислоты (НЖК), мононенасыщенные жирные кислоты (МНЖК) и ПНЖК [64]. Среди НЖК преобладает пальмитиновая кислота, доля которой составляет 12,2–20,6 % от суммы жирных кислот; среди МНЖК доминирует олеиновая кислота (7,7–20,2 %), а ключевыми ПНЖК выступают ЭПК и ДГК, суммарная доля которых совместно с линолевой кислотой достигает 14,1–30,4 % [56]. Кроме того, липидные фракции рыб содержат такие эссенциальные макро- и микроэлементы, как фосфор, серу, йод и бром [44, 60].

Жирнокислотный состав липидов печени трески включает линоленовую (0,4 %), гадолеиновую (8,8–29,8 %), арахидоновую (0,4 %), ЭПК (7,6–19,2 %), докозапентаеновую (0,6 %), ДГК (10,3–24,9 %) кислоты [65, 66]. Характерные для липидов рыб ПНЖК, в особенности ЭПК и ДГК, а также  $\alpha$ -линоленовая кислота, играют важную роль в организме млекопитающих (в т. ч. человека) и обладают различными терапевтическими эффектами [67–69], которые рассмотрены в следующем подразделе.

**Терапевтический эффект рыбного жира.** Установлено, что при ряде заболеваний ключевым фактором благоприятного действия жиров и масел с высокой биологической эффективностью служит их жирнокислотный состав. В пищевых продуктах ПНЖК представлены двумя основными классами – омега-3 и омега-6 жирными кислотами. При этом качественный липидный профиль жирового сырья, богатого омега-3 ПНЖК, способствует снижению уровня триглицеридов и холестерина в крови, проявляет антитромботическую активность и оказывает профилактическое воздействие [70].

Исключительно высокой биологической ценностью в данном контексте обладает рыбный жир. Регулярное потребление рыбного жира как источника омега-3 ПНЖК благоприятно влияет на здоровье человека. Подтверждена его ключевая роль в поддержании функций сердечно-сосудистой системы [71], снижении рисков развития онкологических заболеваний, уменьшении выраженности воспалительных процессов [72], а также в улучшении когнитивных функций и нормализации работы центральной нервной системы [73–75]. Совокупность этих свойств позволяет отнести рыбный жир к категории функциональных пищевых ингредиентов. В связи с этим использование рыбного жира для обогащения продуктов питания представляется эффективным технологическим способом предотвращения дефицита омега-3 ПНЖК в рационе населения [76], в т. ч. у групп потребителей, не имеющих пристрастия или редко употребляющих рыбную продукцию.

Биохимический механизм терапевтического действия этих веществ на клеточном уровне во многом обусловлен участием арахидоновой кислоты, ЭПК и ДГК в синтезе эйкозаноидов – группы соединений,

регулирующих многие важные физиологические функции организма. Под действием фермента циклооксигеназы из ПНЖК образуются лейкотриены и соединения семейства простаноидов, включающего простагландин, простагландины и тромбоксан [77, 78]. Роль простаноидов и лейкотриенов в организме человека чрезвычайно важна, поскольку они выступают ключевыми биорегуляторами клеточных функций. Данные биоактивные вещества липидной природы модулируют секреторную активность органов, регулируют тонус гладкой мускулатуры и кровеносных сосудов, а также определяют адгезионную и агрегационную способность тромбоцитов.

Дисбаланс в синтезе простаноидов и лейкотриенов, обусловленный несбалансированным питанием, приводит к развитию системных патологических изменений в организме. Так, дефицит их образования угнетает адаптационные механизмы тканей, в то время как избыточный или несбалансированный синтез провоцирует хронические воспалительные процессы, нарушения иммунного ответа и сосудистые патологии [78–80]. В связи с этим коррекция липидного профиля рациона человека является важнейшим инструментом снижения риска указанных нарушений.

На системном уровне это проявляется в выраженном кардиопротективном, нейропротективном и онкопрофилактическом эффекте регулярного употребления омега-3 ПНЖК. Клинически доказано их стабилизирующее влияние на частоту сердечных сокращений, способность снижать артериальное давление и уровень атерогенных липидов в крови, что минимизирует риски развития инфаркта миокарда и атеросклероза [43]. Кроме того, регуляция синтеза эйкозаноидов позволяет рассматривать данные жирные кислоты как важный элемент диетотерапии при метаболических и дегенеративных расстройствах, включая ожирение, сахарный диабет второго типа, неалкогольную жировую болезнь печени и болезнь Альцгеймера.

Анализ результатов исследований, представленных в таблице 1, подтверждает, что регулярный прием рыбного жира или употребление жирных видов рыб повышает концентрацию омега-3 ПНЖК в плазме крови, снижает уровень стресса и тревожности, улучшает качество сна и когнитивные функции. При этом корреляция между снижением массы тела и потреблением омега-3 жирных кислот остается неоднозначной. Наряду с этим употребление омега-3 жирных кислот на фоне диеты, поддерживающей фертильность, положительно влияет на оплодотворяемость и качество эмбрионов у бесплодных женщин, а потребление морепродуктов на ранних сроках беременности снижает риск преждевременных родов.

Таким образом, регулярное потребление жирной рыбы и морепродуктов, а также рыбного жира в капсулах, содержащих омега-3 ПНЖК, способно улучшить рацион и устранить дефицит незаменимых нутриентов. В следующем подразделе рассмотрена возмож-



ность оптимизации липидного профиля колбасных изделий за счет включения в их рецептурный состав рыбного жира как эффективного способа доставки омега-3 ПНЖК в организм человека.

**Особенности жирнокислотного состава мяса и мясных продуктов.** Пищевой жир – один из важнейших макронутриентов рациона человека. Организм использует жиры как высокоэффективный источник энергии: они выполняют функцию структурного и резервного вещества, а также служат источником эссенциальных соединений, участвующих в биосин-

тезе клеточных мембран, нервной и мозговой тканей. Потребление жиров в правильном количественном и качественном отношении положительно влияет на состояние здоровья населения.

В настоящее время многочисленные исследования структуры потребления пищевых продуктов – как в западных странах [13], так и в России [88] – свидетельствуют о существенном отклонении от современных принципов здорового питания. Рацион большинства граждан России характеризуется избыточным поступлением насыщенных жиров на фоне выраженного хронического

Таблица 1. Наблюдаемые эффекты воздействия принимаемого рыбного жира на здоровье людей

Table 1. Effects of fish oil on human health

| Используемые добавки и сырье                                 | Дозировка                                                                                                                                                                | Участники                                                                             | Продолжительность | Наблюдаемый эффект                                                                                                                                                                                                                                                                        | Источник |
|--------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|
| Рыбный жир, льняное и конопляное масло в капсулах            | 2 г жира (или масла)/сутки                                                                                                                                               | 86 здоровых мужчин и женщин                                                           | 12 недель         | Увеличение уровня докозагексаеновой и эйкозапентаеновой кислот в плазме крови после 3 месяцев приема рыбного жира. Концентрация $\alpha$ -линоленовой кислоты временно увеличивалась после приема льняных семян. Прием масла конопли не изменил концентрацию жирных кислот в плазме крови | [81]     |
| Жирная рыба (лосось и тунец альбакор), рыбный жир в капсулах | 485 мг эйкозапентаеновой и докозагексаеновой кислот из 2 порций жирной рыбы в неделю или из 1–2 капсулы/сутки                                                            | 23 здоровых женщин в менопаузе в возрасте от 21 до 49 лет                             | 16 недель         | Употребление жирной рыбы еженедельно или ежедневный прием капсул рыбного жира с одинаковым содержанием эйкозапентаеновой и докозагексаеновой кислот оказывает одинаковое влияние на количество омега-3 жирных кислот в липидах крови                                                      | [82]     |
| Капсулы рыбного жира                                         | 5 капсул/сутки (3,0 г эйкозапентаеновой и докозагексаеновой кислот)                                                                                                      | 128 человек с ИМТ от 26 до 40 кг/м <sup>2</sup>                                       | 6 месяцев         | Значимых различий в потере веса между группой принимающей капсулы с омега-3 и плацебо не наблюдалось                                                                                                                                                                                      | [83]     |
| Рыбный жир в капсулах                                        | 1020 мг омега-3 полиненасыщенных жирных кислот (580 мг эйкозапентаеновой кислоты, 390 мг докозагексаеновой кислоты, 50 мг других омега-3 полиненасыщенных жирных кислот) | 40 взрослых добровольцев в возрасте 30–60 лет с ИМТ от 27,0 до 35,0 кг/м <sup>2</sup> | 12 недель         | Уменьшение веса, талии и ИМТ в обеих группах. Жировая масса и процент жира на брюшном животе снизились в группе, принимающей рыбный жир, больше, чем в контрольной группе                                                                                                                 | [84]     |

Продолжение таблицы 1

| Используемые добавки и сырье                                                   | Дозировка                                                                                                                                                                                                                                                                      | Участники                                  | Продолжительность         | Наблюдаемый эффект                                                                                                                                                                                                                                     | Источник |
|--------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|---------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|
| Капсулы омега-3 жирных кислот, витамин D, витамины группы В                    | 1000 мг омега-3 жирных кислот, 1000 МЕ витамина D, 1 мг фолата и 500 мг витамина В <sub>12</sub>                                                                                                                                                                               | 180 бесплодных женщин в возрасте 18–42 лет | 12 месяцев, диета 60 дней | Повышение показателей оплодотворения, скорости формирования эмбрионов, количества образованных эмбрионов                                                                                                                                               | [86]     |
| Морепродукты, богатые омега-3 жирными кислотами: икра, креветки, крабы и мидии | От одного раза в месяц до ежедневного потребления морепродуктов в составе горячего блюда (144 г морепродуктов – 1627 мкг омега-3 жирных кислот), сэндвича (29 г морепродуктов – 431 мкг омега-3 жирных кислот), и салата (50 г морепродуктов – 149 мкг омега-3 жирных кислоты) | 8729 беременных женщин                     | 1992–1996 гг.             | Частота преждевременных родов снизилась в группе, употреблявшей морепродукты в составе горячего блюда и бутербродов не реже одного раза в неделю. Расчетное суточное потребление должно составлять 15 г морепродуктов или 0,15 г омега-3 жирных кислот | [87]     |

дефицита эссенциальных макро- и микронутриентов, в т. ч. длинноцепочечных омега-3 ПНЖК. Их недостаток в организме приводит к возникновению алиментарно-зависимых заболеваний. Поэтому среди различных видов функциональных и обогащенных продуктов питания значимую роль занимают продукты с использованием ПНЖК [89]. Мировой опыт показывает, что обогащение широко употребляемых продуктов повседневного спроса (включая мясные, молочные и хлебобулочные изделия и др.) рыбным жиром является наиболее эффективной стратегией преодоления дефицита омега-3 ПНЖК среди населения [76].

В связи с этим необходимость оптимизации жирового профиля продуктов обусловлена современными требованиями нутрициологии к качественному составу макронутриентов в рационе человека. Всемирной организацией здравоохранения (ВОЗ) разработаны диетические рекомендации по оптимальному потреблению НЖК и ненасыщенных жирных кислот (МНЖК, ПНЖК) [90]. Данные международные рекомендации практически полностью совпадают с действующими в РФ нормами физиологических потребностей в энергии и пищевых веществах [31]. Согласно нормам ВОЗ, общее потребление жиров с пищей для взрослого населения должно составлять 15–30 % калорийности суточного рациона, в России аналогичный показатель не превышает 30 %. При этом регламентируемые соотношения отдельных фракций жирных кислот практически

идентичны: доля НЖК должна равняться не более 10 % от общей энергии рациона, суточная потребность в ПНЖК устанавливается в пределах 6–10 % (с внутренним балансом: 5–8 % для омега-6 и 1–2 % для омега-3 ПНЖК); МНЖК – 10 %. Трансжирные кислоты ограничиваются уровнем менее 1 %, а потребление холестерина лимитируется до 300 мг/сутки. Рекомендованное потребление ЭПК и ДГК омега-3 жирных кислот для пациентов, страдающих ишемической болезнью сердца, составляет 1 г/сутки, для пациентов с гипертриглицеридемией – 2–4 г/сутки ЭПК + ДГК [91]. Дополнительно, с позиции нутрициологии, оптимальное соотношение ПНЖК к НЖК в рационе питания человека должно находиться в интервале от 0,4 до 1,0, а пропорция омега-6 к омега-3 ПНЖК не должна превышать 4:1. Все это подчеркивает глобальную значимость снижения доли НЖК в рационе и подтверждает актуальность изменения липидного профиля традиционных пищевых продуктов на отечественном рынке.

Мясо и мясные продукты занимают особое место в повседневном рационе человека. Эта группа продуктов служит важным источником различных питательных веществ, в особенности белков животного происхождения с высокой биологической ценностью, а также пищевых жиров. Согласно различным прогнозам, глобальные объемы потребления мяса в мире будут стабильно расти, что обусловлено как экономическими, так и культурными факторами [20]. В структуре отечественного продовольственного рынка мясной

продукции значительную долю занимают колбасные изделия, демонстрирующие стабильные темпы производства [18, 92]. Высокий потребительский спрос на данную группу товаров в России обусловлен сочетанием ценовой доступности, развитого ассортимента, удобства употребления, выраженных органолептических свойств и традиционных привычек населения.

Традиционная технология производства мясных колбасных изделий позволяет получить высокопитательный продукт, однако имеет ряд существенных недостатков, ключевой из которых – дисбаланс жировой фракции продукта, обусловленный использованием в рецептуре преимущественно жиров наземных животных. Произведенная таким образом продукция содержит избыточное количество НЖК, регулярное потребление которых связано с повышением уровня холестерина липопротеинов низкой плотности. Поскольку жирность и липидный профиль мясного сырья (в особенности свиного шпика) существенно отличаются от рекомендуемых значений в сторону преобладания НЖК, готовые колбасные изделия характеризуются низким качеством жировых компонентов (в частности, биологической эффективностью липидов) [23].

Следовательно, пищевую и биологическую ценность мясных продуктов можно повысить путем оптимизации качественного и количественного состава липидов, в особенности за счет обогащения омега-3 жирными кислотами из рыбного жира для достижения позитивного эффекта для здоровья человека. В связи с этим требуется улучшение жирнокислотного состава мясного сырья через рацион питания животных или пересмотр рецептур колбасных изделий путем частичной или полной замены шпика альтернативными липидами (источниками ЭПК и ДГК), что может служить эффективным технологическим путем для приведения мясных продуктов в соответствии с международными и отечественными рекомендациями по здоровому питанию [93, 94]. Такое расширение ассортимента выпускаемой мясной продукции за счет добавления полезных для здоровья функциональных ингредиентов может стать отличным методом увеличения потребления ПНЖК населением, приблизить рацион к принципам рационального питания, не требуя существенных изменений в устоявшихся пищевых привычках потребителей [95]. Объективным подтверждением необходимости изменения рецептуры мясных продуктов служат данные о содержании жирных кислот в некоторых видах сырья и готовой колбасной продукции, представленные в таблице 2.

Сравнительный анализ жирнокислотного состава показывает, что липидный профиль сырья наземных животных и традиционной колбасной продукции сформирован преимущественно из НЖК и МНЖК. Несбалансированное питание в сочетании с избыточным поступлением в организм НЖК из колбасных изделий связывают с повышением уровня холестерина и риском развития атеросклероза, сахарного диабета и ожирения.

В качестве здоровой альтернативы традиционным компонентам могут выступать немясные источники липидов, в частности рыбное жировое сырье и рыбные жиры с высоким содержанием ПНЖК. Их внесение в рецептуру колбасных изделий в качестве жирового компонента обеспечивает получение продукта с улучшенным жирнокислотным составом за счет целенаправленного снижения доли НЖК.

Таким образом, учитывая стабильно высокий и прогнозируемый уровень потребления мясной продукции населением и описанный физиологический потенциал липидов рыбного сырья, использование рыбного жира в рецептуре колбасных изделий имеет высокое практическое значение в качестве эффективного инструмента для создания новой продукции с улучшенным жирнокислотным составом [106].

**Использование рыбного жира в колбасных изделиях: способы включения и сохранения.** В современных условиях модификация липидной фракции мясного сырья и мясных продуктов достигается как методами направленного ведения животноводства, так и использованием конкретных технологических решений в процессе его переработки. В первом случае повышение биологической ценности липидов основано на прижизненном формировании качественных характеристик мяса путем оптимизации рациона кормления животных. Добавление рыбного жира или рыбной муки в корма сельскохозяйственных животных позволяет снизить толщину подкожного жира на тушах, сместить жирнокислотный состав мышечной ткани в сторону увеличения доли ПНЖК и уменьшить уровень холестерина [107, 108].

Альтернативный (технологический) подход является более универсальным и заключается в непосредственном изменении рецептурного состава мясopодуlтов. Многочисленные исследования показали возможность замены в колбасных изделиях жиров наземных животных (преимущественно свиного шпика или говяжьего жира) рыбными жирами, растительными маслами или их композициями [98, 109, 110]. При этом особое внимание уделяется медицинским рекомендациям по потреблению омега-3 ПНЖК – 0,25 г ЭПК и ДГК на человека в сутки для поддержания здоровья населения [29, 30].

Несмотря на высокий потребительский спрос на колбасные изделия как на готовые к употреблению продукты, избыточное содержание насыщенных жиров в их составе обуславливает необходимость улучшения липидного профиля. Модификация жирового компонента представляет собой сложную задачу, поскольку введение альтернативных источников жира (в частности, рыбных жиров) напрямую влияет на физико-химические процессы структурообразования мясных эмульсий на этапах измельчения сырья, составления колбасного фарша и его последующей термической обработки [111, 112]. Использование в рецептуре колбас рыбного жира или рыбного жирового сырья направлено

Таблица 2. Содержание жирных кислот в некоторых видах сырья и готовой продукции

Table 2. Content of fatty acids in raw materials and finished products

| Продукт                                                    | Массовая доля жира, % | Насыщенные жирные кислоты, % | Мононенасыщенные жирные кислоты, % | Полиненасыщенные жирные кислоты, % | Полиненасыщенные жирные кислоты: насыщенные жирные кислоты | Источник |
|------------------------------------------------------------|-----------------------|------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------------------------------|----------|
| Мясо                                                       |                       |                              |                                    |                                    |                                                            |          |
| Говядина                                                   | 1,62–5,15             | 50,94                        | 43,71                              | 4,87                               | 0,10                                                       | [96]     |
| Свинина                                                    | 2,15–3,20             | 37,62                        | 46,55                              | 12,86                              | 0,35                                                       |          |
| Свиной жир                                                 | 80,16                 | 38,59                        | 45,62                              | 13,11                              | 0,34                                                       |          |
| Курица                                                     | 1,00–2,55             | 33,43                        | 44,83                              | 21,46                              | 0,65                                                       |          |
| Колбасные изделия                                          |                       |                              |                                    |                                    |                                                            |          |
| Сыровяленая колбаса по-голландски                          | 39,40                 | 44,91–46,04                  | 42,76–43,86                        | 11,20–11,23                        | 0,24–0,25                                                  | [97]     |
| Сыровяленая колбаса (Чоризо)                               | 31,60                 | 37,51                        | 47,41                              | 12,41                              | 0,33                                                       | [98]     |
| Сыровяленая колбаса (Сальчичон)                            | 22,48                 | 35,36                        | 46,05                              | 18,60                              | 0,53                                                       | [99]     |
| Вареная колбаса (Мортаделла)                               | 14,14–23,12           | 38,83–40,87                  | 41,61–43,78                        | 10,82–12,59                        | 0,28–0,31                                                  | [100]    |
| Рыбное жировое сырье                                       |                       |                              |                                    |                                    |                                                            |          |
| Балтийская сельдь ( <i>Clupea harengus membras</i> )       | 5,00–10,00            | 28,06                        | 34,41                              | 37,53                              | 1,34                                                       | [101]    |
| Индийская скумбрия ( <i>Rastrelliger kanagurta</i> )       | 17,30                 | 19,36                        | 11,17                              | 68,65                              | 3,55                                                       | [102]    |
| Жир из печени атлантической трески ( <i>Gadus morhua</i> ) | 99,80                 | 22,43                        | 54,96                              | 22,60                              | 1,01                                                       | [103]    |
| Жир из сардины (рафинированный)                            | 99,80                 | 31,20                        | 22,30                              | 45,50                              | 1,46                                                       | [104]    |
| Печень рыб                                                 |                       |                              |                                    |                                    |                                                            |          |
| Атлантическая треска ( <i>Gadus morhua</i> )               | 59,10                 | 19,42                        | 42,33                              | 32,34                              | 1,67                                                       | [105]    |
| Хек ( <i>Merluccius merluccius</i> )                       | 66,60                 | 21,69                        | 41,63                              | 32,33                              | 1,49                                                       |          |
| Морская щука ( <i>Molva molva</i> )                        | 59,40                 | 19,36                        | 44,81                              | 30,57                              | 1,58                                                       |          |
| Сайда ( <i>Pollachius virens</i> )                         | 72,00                 | 20,53                        | 42,28                              | 31,65                              | 1,54                                                       |          |
| Морской черт ( <i>Lophius piscatorius</i> )                | 40,90                 | 20,86                        | 42,68                              | 30,68                              | 1,47                                                       |          |

на обогащение готового продукта омега-3 ПНЖК. Это требует включения в технологический процесс новых операций по подготовке жировых компонентов, обеспечивающих их эффективное введение и стабилизацию в мясной матрице. На рисунке 1 представлена общая классификация способов внесения рыбного жира в колбасные изделия на стадии получения колбасного фарша. В таблице 3 систематизированы результаты исследований по обогащению колбасных изделий рыбным жиром с целью снижения содержания животных жиров и улучшения профиля жирных кислот.

Рыбный жир используется в рецептурах эмульгированных (вареных) и структурированных (сыровяленых) колбасных изделий в виде чистого (натурального) жира, в предварительно эмульгированной или инкапсулированной форме, либо в составе рыбного жирового сырья [100]. В результате такой модификации повышается уровень ПНЖК, улучшается состав жирных кислот (ПНЖК:НЖК) и снижается общее содержание холестерина в готовых мясных продуктах. Выбор конкретного метода введения обусловлен технологическими особенностями производства. Так, применительно





Рисунок 1. Способы введения рыбного жира в колбасные изделия

Figure 1. Methods of introducing fish oil into sausage products

Таблица 3. Колбасные изделия, приготовленные с использованием рыбных жиров

Table 3. Sausage products with fish oil

| Продукт                           | Рыбное жировое сырье                                                                    | Количество в рецептуре, % | Насыщенные жирные кислоты, % | Мононенасыщенные жирные кислоты, % | Полиненасыщенные жирные кислоты, % | Омега-3 полиненасыщенные жирные кислоты, г/100 продукта | Омега-6:омега-3 | Полиненасыщенные жирные кислоты: насыщенные жирные кислоты | Источник |
|-----------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------------------------------|-----------------|------------------------------------------------------------|----------|
| Сыровяленая колбаса по-голландски | Рыбный жир (высокоочищенный)                                                            | 4,50–9,00                 | 41,76–40,81                  | 43,70–43,40                        | 14,55–15,78                        | –                                                       | 1,74–1,35       | 0,35–0,39                                                  | [97]     |
|                                   | Инкапсулированный рыбный жир                                                            |                           | 40,77–37,64                  | 43,21                              | 15,62–19,15                        | –                                                       | 1,62–0,90       | 0,38–0,51                                                  |          |
| Сыровяленая колбаса               | Инкапсулированный рыбный жир из печени трески (однослойные и многослойные микрокапсулы) | 3,00–5,00                 | –                            | –                                  | –                                  | $(5,60–6,10) \times 10^{-2*}$                           | –               | –                                                          | [113]    |
| Вареные колбасы                   |                                                                                         |                           | –                            | –                                  | –                                  | $4,30 \times 10^{-2*}$                                  | –               | –                                                          |          |
| Сыровяленая колбаса (Сальчичон)   | Инкапсулированный рыбный жир (однослойные микрокапсулы)                                 | 5,00–15,00                | 35,18–35,43                  | 46,04–45,54                        | 18,78–19,03                        | 0,25–0,28                                               | 13,39–9,62      | 0,53–0,54                                                  | [99]     |
| Сыровяленая колбаса               | Микрокапсулы (однослойные и многослойные) рыбного жира из печени трески                 | 3,00–5,00                 | –                            | –                                  | –                                  | –                                                       | –               | –                                                          | [114]    |
| Вареные колбасы                   |                                                                                         |                           | –                            | –                                  | –                                  | –                                                       | –               | –                                                          |          |
| Сыровяленая колбаса (Чоризо)      | Эмульгированная комбинация жиров (оливковое, льняное масло и рыбный жир)                | 16,30–18,50               | 33,16–24,86                  | 44,64–47,50                        | 22,74–25,43                        | 1,05–1,12                                               | 1,19            | 0,76–1,02                                                  | [98]     |
| Сыровяленая колбаса               | Эмульгированный рыбный жир (дезодорированный)                                           | 3,30                      | 36,06                        | 43,25                              | 20,29                              | 1,41                                                    | 2,97            | 0,56                                                       | [115]    |
| Голландская сыровяленая колбаса   | Инкапсулированный рыбный жир                                                            | 4,50                      | 41,45                        | 45,81                              | 12,74                              | –                                                       | 9,59            | 0,31                                                       | [116]    |

Продолжение таблицы 3

| Продукт                                           | Рыбное жировое сырье                                                                            | Количество в рецептуре, % | Насыщенные жирные кислоты, % | Мононенасыщенные жирные кислоты, % | Полиненасыщенные жирные кислоты, % | Омега-3 полиненасыщенные жирные кислоты, г/100 продукта | Омега-6:омега-3 | Полиненасыщенные жирные кислоты:насыщенные жирные кислоты | Источник   |
|---------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------------------------------|-----------------|-----------------------------------------------------------|------------|
| Сыровяленая колбаса (Чоризо де Памплоне)          | Рыбный жир (концентрат)                                                                         | 0,50–1,10                 | –                            | 12,60–13,80                        | –                                  | 0,56–1,01                                               | 7,7–5,3         | 0,50–0,58                                                 | [117]      |
| Вареные колбасы (Мортаделла)                      | Эмульгированный рыбный жир                                                                      | 1,00–6,00                 | 32,42–33,95                  | 44,35–46,49                        | 19,03–20,73                        | 0,44–1,49                                               | 7,07–2,54       | 0,56–0,64                                                 | [100]      |
| Вареные колбасы с низким содержанием жира         | Рыбный жир (дезодорированный рафинированный)                                                    | 5,00                      | –                            | –                                  | –                                  | –                                                       | –               | –                                                         | [118]      |
| Сосиски с низким содержанием жира                 | Эмульгированная комбинация оливкового, льняного и рыбного жира                                  | –                         | 19,30                        | 46,90                              | 33,60                              | –                                                       | 0,47            | 1,70                                                      | [110, 119] |
| Сосиски с низким содержанием жира                 | Рыбный жир (дезодорированный)                                                                   | 5,00                      | –                            | –                                  | –                                  | –                                                       | –               | –                                                         | [36]       |
| Вареные колбасы                                   | Полуфабрикат рыбного жира из печени трески                                                      | 3,00                      | –                            | –                                  | –                                  | 0,73                                                    | 0,58            | –                                                         | [120–122]  |
| Сосиски                                           | Полуфабрикат печени трески                                                                      | 25,70                     | 38,75                        | 38,02                              | 23,29                              | 2,79                                                    | 0,26            | 0,60                                                      | [66, 123]  |
| Нежирные колбаски с пониженным содержанием натрия | Эмульгированный рыбный жир (дезодорированный рафинированный) с добавлением 1000 ppm токоферолов | 5,00                      | –                            | –                                  | –                                  | –                                                       | –               | –                                                         | [124]      |
| Вареные колбасы                                   | Микрокапсулы с жиром из печени трески                                                           | 2,75; 5,26                | 35,61–35,83                  | 35,65–35,70                        | 28,53–28,70                        | –                                                       | 6,48–6,49       | 0,80–0,81                                                 | [125]      |
| Сыровяленые колбасы                               |                                                                                                 | 2,75; 5,26                | 36,53–36,74                  | 35,55–37,78                        | 25,69–27,71                        | –                                                       | 10,55–10,96     | 0,70–0,75                                                 |            |
| Сосиски                                           | Рыбный фарш из мяса карпа                                                                       | 46,50–53,50               | 35,50–38,20                  | 52,00–53,20                        | 10,10–10,70                        | 1,56–2,00                                               | 4,36–5,91       | 0,26–0,30                                                 | [126]      |

Примечание: \* – ЭПК + ДГК.

Note: \* – EPC + DGK.

к вареным колбасным изделиям замещение жира наземных животных направлено в основном на получение мясных эмульсий со стабильной структурой и пониженным содержанием жира.

В то же время введение чистого рыбного жира (концентрата) в рецептуры фаршевых мясных изделий сопряжено с определенными технологическими рисками [97]. Жидкое агрегатное состояние жиров рыб при комнатной температуре способно вызвать ряд трудностей на этапе фаршесоставления. В частности, необходимо не допускать коалесцирования

частиц жира на стадии куттерования (приготовления колбасного фарша) и последующей термообработке, которая ускоряет данный процесс. Для предотвращения образования дефектов в виде бульонно-жировых отеков, способствующих потере жидкости и снижению качества готового продукта, рыбный жир рекомендуется вводить в виде устойчивой эмульсии, гарантирующей стабильность структуры колбасного фарша [127].

Жиры и масла играют важную роль в рецептурах и процессах изготовления различных пищевых продуктов. Многие характеристики определяются маслом

жировыми ингредиентами. Липидная фракция влияет на структуру, стабильность, вкус, сроки годности, органолептические свойства и товарный вид готовых изделий. Жирнокислотный и триглицеридный состав жиров определяет функциональные свойства пищевых систем даже при умеренном содержании жира в продукте [128]. Поэтому при использовании новых жировых компонентов в рецептуре колбасных изделий необходимо применять комплексный подход к оценке их качества и пищевой безопасности.

Рыбный жир подвержен окислительной порче и способен негативно влиять на органолептические показатели готового продукта – формировать специфический рыбный аромат и привкус, снижающие потребительские свойства изделия. Эти факторы ограничивают применение данного сырья в технологии обогащенных колбасных изделий [129–131]. В связи с этим необходимо решить две задачи: установить оптимальную дозировку вносимого рыбного жира (в диапазоне от 1,0 до 60,0 г/кг фарша) и предотвратить ухудшение органолептических характеристик продукта – за счет специальной упаковки с высокими барьерными свойствами (защита от кислорода и света) и создания определенных условий хранения [76, 132].

В настоящее время риски окислительной порчи могут быть минимизированы за счет рафинации и дезодорации жира, а также применения различных антиоксидантов [133, 134]. Антиоксиданты подавляют окислительные процессы и снижают уровень свободных радикалов и липидных гидропероксидов, непосредственно влияющих на профиль летучих веществ и вызывающих появление неприятных запахов и привкусов. В качестве наиболее эффективных антиоксидантов для стабилизации масел и жиров, богатых ПНЖК, используются токоферолы ( $\alpha$ -,  $\gamma$ - и/или  $\delta$ -), розмариновая кислота и экстракт розмарина, богатые карнозиновой кислотой, лецитин и лимонная кислота [135].

Наряду с прямым введением антиоксидантов, важную роль в предотвращении окислительной порчи обогащенных мясных продуктов играет оптимизация состава других рецептурных компонентов, в частности посолочных веществ. Хлорид натрия – известный прооксидант, интенсифицирующий окисление липидов при производстве колбас. В исследовании [136] показано, что применение посолочных смесей с пониженным содержанием хлорида натрия замедляет накопление продуктов окисления липидов в мясных продуктах. Также установлено, что частичная замена хлорида натрия на хлориды калия и магния или на композицию хлоридов калия и кальция тормозит окислительные процессы, обеспечивая при этом сохранение традиционных органолептических характеристик готовых колбасных изделий.

Добавление рыбного жира в рецептуру колбасных изделий напрямую влияет на их структуру и органолептические показатели. Благодаря рыбному жиру формируется более мягкая консистенция колбас, при этом улуч-

шаются органолептические свойства продукта, наблюдается положительная корреляция между количеством вносимого жира и оценкой по консистенции [100]. Данный эффект может объясняться высокой эмульгирующей и связывающей способностью белков мясного сырья, формирующих стабильную пространственную матрицу (гель), удерживающую диспергированные капли жира.

Физико-химические свойства жира играют определяющую роль в формировании качественных характеристик готового продукта. Поведение липидов в мясной белковой матрице зависит от вида изделия (фарш, вареная или сыровяленая колбаса и т. д.), степени измельчения сырья в процессе куттерования и функционально-технологических свойств сопутствующих ингредиентов [137]. Технология прямых эмульсий типа «масло в воде» показала свою эффективность в качестве средства стабилизации рыбных жиров при включении их в состав мясных продуктов. Использование таких эмульсий для частичной замены свиного шпика открыло новые возможности для создания обогащенных мясных продуктов с заданными реологическими характеристиками и обладающих повышенной пищевой ценностью.

В современных исследованиях для стабилизации рыбного жира (в чистом виде или в комбинации с оливковым и льняным маслами) применяются различные белковые системы (на основе соевого [110, 115] или молочного белков [100, 124]), а также стабилизирующие гели на основе конжаковой муки [98]. Эти компоненты используются как отдельно, так и в смеси с каррагинанами, кукурузным крахмалом и микробной трансглютаминазой. В частности, установлено увеличение твердости, когезивности и адгезивности текстуры вареных колбас (типа бologna) с рыбным жиром за счет добавления в их составе предварительно подготовленных белково-жировых эмульсий на основе казеинатов [100]. Эти белки формируют защитное покрытие на поверхности жировых капель и обеспечивают прочную связь между компонентами системы, что позволяет повышать плотность консистенции готового изделия [138]. Введение таких эмульсий в количестве от 2 до 25 % позволяет не только предотвратить образование жировых отеков, но и обеспечить профиль жирных кислот, соответствующий современным медицинским рекомендациям по здоровому питанию.

Для максимально высокой стабильности ПНЖК в технологическом процессе применяется инкапсулирование (микрокапсулирование) рыбного жира, представленное на рисунке 1 [113, 139]. Данный метод представляет собой процесс заключения микрочастиц целевого вещества в защитную оболочку из биополимерного пленкообразующего материала, что позволяет перевести жидкий рыбный жир в сухую порошкообразную форму. Полная изоляция ПНЖК от контакта с внешней средой устраняет технологические трудности, связанные с высокой гидрофобностью жира, а также маскирует специфический вкус и запах рыбного сырья.

Перспективным направлением является совместное использование рыбного жира и растительных масел (в особенности оливкового и льняного) взамен свиного шпика в технологии сыровяленых колбас, сосисок и мясных паштетов, что позволяет существенно улучшить жирнокислотный профиль продукта [110, 137, 140]. Введение в рецептуру сосисок композиции рыбного жира и оливкового масла обеспечивает направленное обогащение готового продукта омега-3 жирными кислотами. Так, при отдельном использовании микрокапсулированного рыбного жира содержание ЭПК составляет 50,4 мг, ДГК – 168,6 мг на 100 г продукта. В случае применения свободной (некапсулированной) комбинации рыбного жира и масла концентрация эйкозапентаеновой и ДГК в 100 г колбасного изделия достигает 107,9 и 400,2 мг соответственно [141].

В области пищевых технологий, среди существующих способов микрокапсулирования, наибольшее распространение получил метод комплексной коацервации [142–144]. За счет формирования прочного межфазного барьера вокруг капель жира данный способ ограничивает диффузию кислорода внутрь коацервированных микрокапсул и предотвращает накопление нежелательных вторичных продуктов распада (альдегидов и кетонов), гарантируя стабильность органолептических показателей и безопасность готовых изделий [145, 146]. Исследованиями подтверждена высокая стабильность жирорастворимых витаминов [143], а также концентратов омега-3 жирных кислот при их инкапсулировании с использованием коацерватов [147].

В научных исследованиях особое внимание уделяется коацерватам на основе белков и полисахаридов благодаря высокой совместимости биополимеров и относительной простоте их получения. Комплексная коацервация происходит при значениях pH, обеспечивающих противоположные плотности зарядов полимеров и их взаимную нейтрализацию. Для достижения максимальной степени коацервации строго контролируются температура и ионная сила. При создании систем белок-полисахарид, как правило, используют животные, молочные либо растительные белки и анионные полисахариды [148]. Однако применяют и желатин, полученный из млекопитающих и рыб. Он обладает ценными функционально-технологическими свойствами: способностью к термообратимому структурообразованию, биоразлагаемостью и доступной стоимостью, выполняя в пищевых системах роли пенообразователя, эмульгатора и стабилизатора [149].

Опыт использования коацерватов на основе желатина с анионными полисахаридами (пектином и альгинатом натрия) свидетельствует об их высокой термостабильности даже при интенсивном нагревании [150–152]. Применительно к технологиям мясных продуктов данный подход открывает возможность успешного введения микрокапсулированного рыбного жира в состав колбасного фарша. Защитная биополимерная оболочка выдерживает технологические режимы термической

обработки колбас (обжарку и варку), надежно изолируя ПНЖК от температурного воздействия и предотвращая появление постороннего привкуса в готовом продукте.

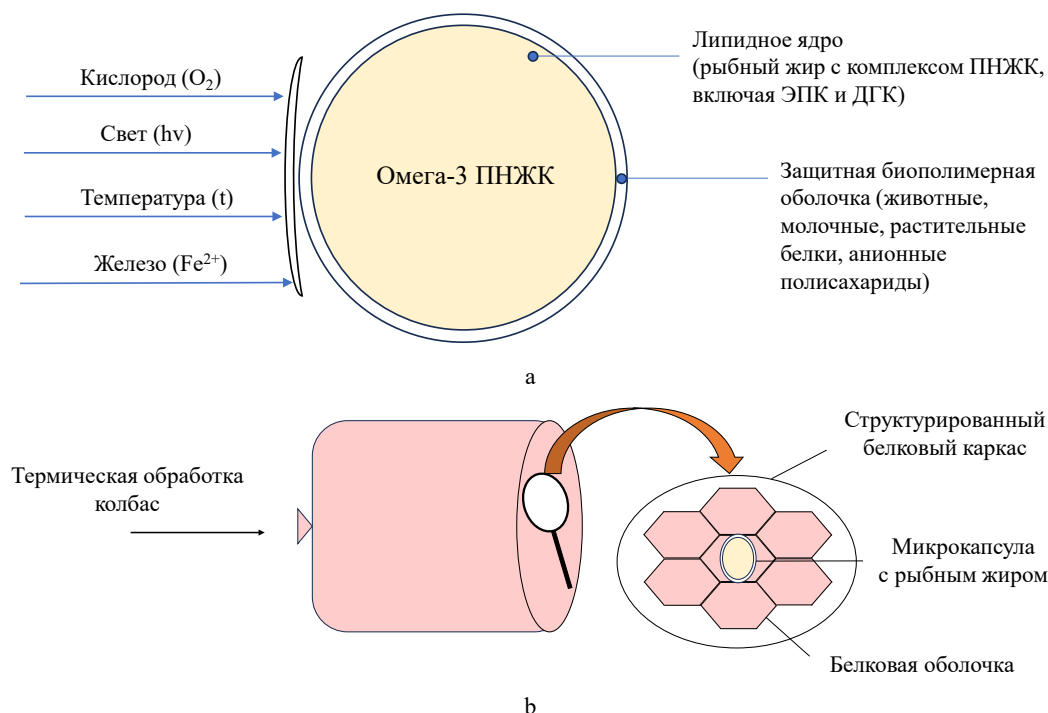
На рисунке 2 проиллюстрирована схема строения полимерной микрокапсулы с рыбным жиром и принцип ее стабилизации в мясной матрице. При составлении колбасного фарша и последующей термической обработке колбасных изделий микрокапсулы стабильно удерживаются в трехмерной пространственной структуре мясного геля, образуемого миофибриллярными белками. Применение микрокапсулирования при обогащении мясных продуктов, в т. ч. колбас, омега-3 ПНЖК позволяет защитить неустойчивые биологически активные соединения от контакта с окислителями (железо, свет, кислород и высокие температуры), улучшить биодоступность данных веществ, замаскировать неприятный вкус или запах, повысить твердость, а также повлиять на соленость готового продукта [97, 153].

Установлено, что многослойные микрокапсулы эффективнее защищают инкапсулированные биоактивные соединения (омега-3 ПНЖК) рыбного жира от окисления, чем однослойные микрокапсулы [114, 154]. При этом улучшение качественных характеристик однослойных капсул может быть достигнуто за счет подбора оптимальных режимов гомогенизации под высоким давлением исходных эмульсий рыбного жира [155]. В то же время в ряде исследований отмечено, что частичная замена свиного шпика микрокапсулированным рыбным жиром способна вызывать интенсификацию окисления липидов по сравнению с контрольными образцами колбас и колбасами, содержащими некапсулированное оливковое масло и рыбный жир [141].

Таким образом, анализ научно-практических данных свидетельствует об успешном опыте разработки рецептур колбасных изделий с использованием рыбного жира. Созданы новые рецептуры мясных колбас с использованием рыбных жиров. На рисунке 3 представлен внешний вид колбасных изделий, приготовленных с использованием печени трески [66] и рыбного жира [121]. Такая продукция имеет улучшенный химический состав, что способствует дополнительному обеспечению организма человека незаменимыми омега-3 ПНЖК. Несмотря на введение в рецептурный состав нетрадиционных рыбных ингредиентов (полуфабриката и жира из печени трески), органолептические показатели готовых колбас свойственны характеристикам традиционных мясных изделий.

**Безопасность и ограничения использования рыбного жира в колбасах.** Пищевая жировая продукция из рыбного сырья широко представлена на рынке биологически-активных добавок (БАД) к пище. Рыбные жиры продаются преимущественно в форме капсул и жидкой форме – жидкие экстракты. В последнее время отечественный рынок БАД показывает активный рост, что вызвано работой органов здравоохранения и общей осведомленностью населения о влиянии





ПНЖК – полиненасыщенные жирные кислоты; ЭПК – эйкозапентаеновая кислота; ДГК – докозагексаеновая кислота

Рисунок 2. Схема строения полимерной микрокапсулы с рыбным жиром (а) и принцип ее стабилизации в мясной матрице (b)

Figure 2. Polymeric microcapsule with fish oil (a) and its stabilization in meat matrix (b)



Рисунок 3. Внешний вид колбасных изделий с рыбным жиром, обогащенных омега-3 полиненасыщенными жирными кислотами: а – сосиски с добавлением печени трески; б – вареные колбаски с добавлением жира из печени трески

Figure 3. Sausages with fish oil fortified with omega-3 polyunsaturated fatty acids: a – sausages with cod liver; b – boiled sausages with cod liver

правильного питания и образа жизни на здоровье. По оценкам BusinesStat, производство БАД в России выросло с 2020 по 2024 гг. на 16,3 %: с 375 до 436 млн упаковок. Тем не менее БАД принимают лишь 15 % населения России – время от времени, а регулярно – только около 3 %.

Более доступной альтернативой БАД как дополнительному источнику омега-3 жирных кислот могут служить колбасные изделия с рыбным жиром. Позитивное влияние рыбного жира на здоровье, включая его роль в снижении риска сердечно-сосудистых заболеваний,

хорошо документировано и общепризнано. Также имеются данные о применении рыбного жира во время беременности для здорового развития плода и доношения беременности. Тем не менее употребление колбас с рыбным жиром требует строгой оценки эффективности и обеспечения безопасности. Совместный прием БАД на основе рыбного жира и обогащенных колбасных изделий может быть связан с риском избыточного поступления жирных кислот и витаминов в организм человека, что создает предпосылки для передозировки и развития гипervитаминоза [156].

Состав и упаковка обогащенных рыбным жиром колбасных изделий, а также условия их хранения требуют особой проработки для обеспечения стабильности входящих в продукт омега-3 жирных кислот. В большинстве случаев для обогащенных продуктов отсутствуют крупномасштабные испытания эффективности, хотя они свободно продаются на рынке. Без таких испытаний и последующего одобрения со стороны регулирующих органов эти продукты не могут занять достойное место на рынке функциональных пищевых продуктов и завоевать доверия потребителей. Важно, чтобы дозировка омега-3 жирных кислот была четко указана, а контроль качества обеспечивал возможность окончательных рекомендаций по применению конкретного продукта для конкретной цели.

Научно-медицинская проверка разрабатываемых пищевых продуктов, обогащенных омега-3 жирными кислотами за счет использования рыбных жиров, чрезвычайно медленная и трудоемкая. Маркировка таких продуктов должна содержать отличительные сведения о пищевой ценности и эффективности. Согласно Регламенту (ЕС) № 116/2010 от 9 февраля 2010 г. в отношении перечня заявлений о пищевой ценности для маркировки продукта как источника омега-3 жирных кислот сумма ЭПК и ДГК в продукте должна составлять не менее 40 мг на 100 г или на 100 ккал, а для маркировки как продукта с высоким содержанием омега-3 жирных кислот – не менее 80 мг на 100 г или на 100 ккал. В свою очередь, отечественные стандарты устанавливают требования не к отдельным жирным кислотам, а к сумме всех омега-3 жирных кислот. В соответствии с ГОСТ Р 55577-2013 «Продукты пищевые функциональные. Информация об отличительных признаках и эффективности» продукт, являющийся источником омега-3 жирных кислот должен содержать не менее 0,2 г суммы омега-3 жирных кислот на 100 г или на 100 см<sup>3</sup> продукта, продукт с высоким содержанием омега-3 жирных кислот – не менее чем 0,4 г на 100 г или на 100 см<sup>3</sup> продукта. Отсутствие такой информации, с помощью которой потребители могут судить об эффективности и безопасности продаваемых продуктов, ограничивает их применение в профилактике алиментарно-зависимых заболеваний.

Несмотря на добавленную пищевую ценность, колбасные изделия, обогащенные омега-3 жирными кислотами, пока остаются продуктом с высоким содержанием пищевой соли и консервантов (нитрит и нитрат натрия, калия, сорбиновая кислота и др.), что не нивелирует основные риски для здоровья и может вызывать недоверие со стороны потребителя. Вместе с тем добавление рыбного жира снижает стабильность омега-3 жирных кислот к окислению, что может приводить к ухудшению вкуса и аромата, а замена животного жира вызывает негативные изменения консистенции продукта.

При всех положительных эффектах применения рыбного жира отмечается, что он может проявлять

некоторые побочные эффекты при определенных условиях: его прием беременными женщинами ограничен из-за высокого содержания витамина А (опасен для плода в первом триместре) и риска наличия примесей ртути и диоксинов. Кроме того, результаты исследований показали, что высокие дозы могут вызывать повышенный риск ожирения у детей в будущем. В рыбном жире могут оставаться частицы рыбного белка – парвальбумина, вызывающие IgE-опосредованную аллергию.

Хотя употребление колбасных изделий с рыбным жиром может быть сопряжено с рядом ограничений, их обычно считают безопасными. На сегодняшний день нет значимой информации о проблемах безопасности и неблагоприятного воздействия в отношении рыбного жира на здоровых людей. Несмотря на то что некоторые преимущества для здоровья, включая снижение риска сердечно-сосудистых заболеваний, хорошо изучены и приняты, другие требуют дальнейшего изучения, в т. ч. потенциальное применение при болезни Альцгеймера [157]. Рыбный жир давно применяется в пищевых целях, и значимых проблем со здоровьем не отмечено – именно этот факт остается наиболее надежным критерием безопасности.

**Направления будущих исследований.** В настоящее время, говоря о колбасных изделиях, подразумевают высококалорийный мясной продукт, частое употребление которого связано с высоким риском возникновения заболеваний сердечно-сосудистой системы, а также нарушением обмена веществ вследствие высокого содержания в таких продуктах насыщенных жиров и холестерина. Вместе с тем по мере развития пищевых технологий и ростом потребительского спроса на сбалансированное питание следует прогнозировать разработку и внедрение усовершенствованных технологий обогащенных и функциональных мясных продуктов, которые обладают положительным влиянием на здоровье потребителей.

Рыбный жир является качественным источником омега-3 ПНЖК, которые выполняют множество полезных функций для организма человека. Частичная замена животных жиров на рыбный жир в колбасных изделиях целесообразна с точки зрения увеличения содержания ПНЖК и витаминов А, D, Е в рационе населения. При этом возникает вопрос сохранения данных веществ в готовом продукте, т. к. известно, что тепловая обработка разрушает отдельные витамины, усиливает окисление и гидролиз жира.

Основные направления применения рыбного жира в колбасных изделиях будут основываться на сохранении данных термолабильных веществ в технологическом процессе приготовления продукта путем совершенствования предложенных методов микрокапсулирования. Возможность достижения поставленной цели будет определять текущие виды использования и дополнительные применения. Создание устойчивых прямых эмульсий на основе рыбного

жира путем формирования комплексных коацерватов белок-полисахарид (*in situ* и *ex situ*) позволит эффективно стабилизировать системы с высокой концентрацией ПНЖК. Данный подход позволит решить ключевые проблемы современных технологий обогащения пищевых продуктов ПНЖК, такие как низкая стабильность, окисляемость жиров и ухудшение органолептических свойств продукта. Разработанные эмульсии обеспечат наличие высокой биодоступности и сохранности ПНЖК в процессе переработки и хранения конечного продукта, открывая новые возможности для промышленного производства обогащенных и функциональных колбасных изделий с улучшенными пищевыми свойствами и органолептическими характеристиками.

Несмотря на большое число публикаций, посвященных микрокапсулированию биоактивных ингредиентов, необходимо исследовать методы улучшения свойств смесей белков и полисахаридов и их взаимодействия для более надежной защиты активных ингредиентов и их отсроченного высвобождения в различных пищевых системах. Также стоит учитывать взаимодействие белка, используемого для комплексной коацервации, с активным веществом, и их влияние на конформацию биополимера и структурные функции. Важно изучить влияние комплексных коацерватов на функциональные и органолептические свойства колбасных изделий во время обработки и хранения.

Поскольку использование рыбного жира часто сопровождается изменением структуры и органолептических показателей продукта, требуется глубокое понимание химических процессов – взаимосвязей различных компонентов и их изменений в ходе технологической переработки. Представляется перспективным создание персонализированных колбасных изделий с рыбным жиром для разных возрастных групп – особенно для детей старше трех лет и пожилых людей – и оценка их влияния на нутритивный (пищевой) статус.

Обогащенные продукты, доступные на рынке, могут содержать различные функциональные пищевые ингредиенты. Поэтому их потребление и воздействие на здоровье следует оценивать как при раздельном применении, так и в сочетании. Органы здравоохранения совместно с производителями должны участвовать в разработке обогащенных пищевых продуктов. При этом необходимо разработать четко определенные процедуры исследований состава, чтобы потребители были уверены в повышенной пищевой ценности и эффективности таких продуктов.

Повышение уровня омега-3 жирных кислот в колбасных изделиях за счет введения рыбного жира для их дальнейшего использования диетотерапии требует активного участия не только производителей, но и врачей. При этом врачи все еще скептически относятся к обогащенным и функциональным продуктам питания как средству улучшения здоровья и снижения риска заболеваний.

## Выводы

Рост алиментарно-зависимых заболеваний, обусловленный дисбалансом рациона, недостатком микронутриентов или хроническим перееданием, приводит к развитию сахарного диабета, ожирения, сердечно-сосудистых заболеваний и других патологий. Это указывает на необходимость совершенствования профилактических мероприятий. Поэтому эффективным подходом к профилактике метаболических заболеваний являются рациональное питание и создание обогащенных продуктов. Обогащение пищевых продуктов рыбным жиром позволяет получать продукты, снижающие риск сердечно-сосудистых заболеваний и вероятность возникновения онкологических, аутоиммунных и воспалительных процессов.

Анализ научных публикаций показал, что потребление традиционных колбас может быть связано с потенциальным риском для здоровья человека из-за высокого содержания в них насыщенных жирных кислот (НЖК) и холестерина, которые способствуют развитию сердечно-сосудистых заболеваний и ожирения. Рыбный жир обладает высоким потенциалом и может найти широкое применение в мясной промышленности в качестве функционального пищевого ингредиента. Повышения качества и пищевой ценности колбасных изделий путем введения в рецептуру рыбного жира – отдельно или в сочетании с растительными маслами, в различных формах и концентрациях – позволяет получить продукт с улучшенными пищевыми свойствами и оригинальными органолептическими характеристиками. Замена жира наземных животных на рыбный жир позволит уменьшить содержание насыщенного жира, повысить уровень полиненасыщенных жирных кислот (ПНЖК), улучшить качественный состав жирных кислот (ПНЖК:НЖК) и снизить содержание холестерина в колбасных изделиях.

В результате может быть решена проблема коррекции и улучшения липидного компонента колбас. Тем не менее для широкого применения данной технологии необходимы дополнительные исследования, направленные на разработку эффективных и доступных методов сохранения ценных веществ в готовом продукте. Прямое добавление рыбного жира, эмульгирование и микрокапсулирование являются наиболее распространенными методами, используемыми для обогащения пищевых продуктов рыбным жиром. Применение антиоксидантов и микрокапсулирования оказывает значительное влияние на защиту от окисления омега-3 жирных кислот в обогащенных продуктах, а также позволяет минимизировать негативное воздействие внешних факторов при хранении.

Таким образом, рассмотренные материалы однозначно свидетельствуют о перспективности и целесообразности замены части жиров наземных животных в рецептуре колбасных изделий на более ценные жиры рыб (возможно, в сочетании с растительными маслами). Чтобы улучшить липидный состав колбасных изделий

за счет использования рыбного жира и сохранить их традиционные характеристики, необходимо учитывать взаимодействие липидных компонентов и их влияние на продукт в целом. Липиды, выделенные из морских гидробионтов, по сравнению с жирами наземных животных обладают иными физико-химическими свойствами из-за чего необходимо создавать особые условия для переработки мясного сырья для достижения желаемых качественных характеристик готового продукта. Такая замена требует дополнительных действий по стабилизации вкусоароматических характеристик, а также консистенции готового продукта. Полученная продукция (при условии соблюдения рекомендаций по производству и сроков годности) может быть использована широкими слоями населения как замена традиционным колбасным изделиям в рационе, что позволит достичь ряда положительных эффектов для здоровья потребителей, в т. ч. снизить риск сердечно-сосудистых заболеваний и отрегулировать липидный обмен.

#### Критерии авторства

А. Ю. Глухарев – постановка научной гипотезы, формулировка цели, проведение литературного обзора и подготовка статьи, формулирование выводов. В. И. Волченко, В. А. Гроховский – осуществление общего руководства исследованием, редактирование статьи, формулировка выводов. Д. С. Колотова – редактирование статьи, формулировка выводов. Все авторы ознакомились и согласились с опубликованной версией рукописи.

#### Конфликт интересов

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

#### Благодарности

Выражаем благодарность всем исследователям, занимающимся по тематике использования жира из рыбного сырья в рецептуре колбасных изделий, материалы которых были использованы при написании работы.

#### Contribution

A.Yu. Glukharev defined the scientific hypothesis, stated the objectives, conducted the review, formulated the conclusions, and wrote the manuscript; V.I. Volchenko and V.A. Grokhovsky supervised the study, proofread the article, and formulated the conclusions. D.S. Kolotova proofread the article and formulated the conclusions. All the authors read and agreed to the published version of the manuscript.

#### Conflict of interest

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

#### Acknowledgments

The authors express their deepest gratitude to all the researchers cited in this article, who work on the use of fish oil in sausage formulations.

#### Список литературы / References

1. Campagnol PCB, Lorenzo JM, Dos Santos BA, Cichoski AJ. Recent advances in the development of healthier meat products. *Advances in Food and Nutrition Research*. 2022;102:123–179. <https://doi.org/10.1016/bs.afnr.2022.04.009>
2. Jiménez-Colmenero F, Carballo J, Cofrades S. Healthier meat and meat products: Their role as functional foods. *Meat Science*. 2001;59(1):5–13. [https://doi.org/10.1016/S0309-1740\(01\)00053-5](https://doi.org/10.1016/S0309-1740(01)00053-5)
3. Брезе О., Мышалова О., Дорогайкина О., Киреев В. Проектирование новой мясной продукции высокого качества в соответствии с потребительскими предпочтениями. *Техника и технология пищевых производств*. 2014. № 4. С. 133–140 [Brese O, Myshalova O, Dorogaykina O, Kireev V. Development of new high quality meat products in accordance with consumer preferences. *Food Processing: Techniques and Technology*. 2014;4:133–140. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/TGSLAF>
4. Macho-González A, Bastida S, Garcimartín A, López-Oliva ME, González P, *et al.* Functional meat products as oxidative stress modulators: A review. *Advances in Nutrition*. 2021;12(4):1514–1539. <https://doi.org/10.1093/advances/nmaa182>
5. Serikkyzy M, Kapysheva U, Kenenbay S. Development of functional meat products based on the food safety system. *Scientific Reports*. 2026;16:601. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-30088-0>
6. Arihara K, Ohata M. Functional meat products. In: Saarela M, editor. *Functional Foods*. Cambridge: Woodhead Publishing; 2011. p. 512–533. <https://doi.org/10.1533/9780857092557.3.512>
7. Коденцова В. М., Вржесинская О. А., Рисник Д. В., Никитюк Д. Б., Тутельян В. А. Обеспеченность населения России микронутриентами и возможности ее коррекции. Состояние проблемы. Вопросы питания. 2017. Т. 86. № 4. С. 113–124. [Kodentsova VM, Vrzhesinskaya OA, Risnik DV, Nikityuk DB, Tutelyan VA. Micronutrient status of population of the Russian Federation and possibility of its correction. State of the problem. *Problems of Nutrition*. 2017;86(4):113–124. (In Russ.)] <https://doi.org/10.24411/0042-8833-2017-00067>
8. Коденцова В. М., Рисник Д. В. Микронутриентные метаболические сети и множественный дефицит микронутриентов: обоснование преимуществ витаминно-минеральных комплексов. *Микроэлементы в медицине*. 2020. Т. 21. № 4. С. 3–20. [Kodentsova VM, Risnik DV. Micronutrient metabolic networks and multiple micronutrient deficiency: A rationale for the advantages of vitamin-mineral supplements. *Microelements in Medicine*. 2020;21(4):3–20. (In Russ.)] <https://doi.org/10.19112/2413-6174-2020-21-4-3-20>



9. Авдеева В. А., Суплотова Л. А., Пигарова Е. А., Рожинская Л. Я., Трошина Е. А. Дефицит витамина D в России: первые результаты регистрового неинтервенционного исследования частоты дефицита и недостаточности витамина D в различных географических регионах страны. Проблемы эндокринологии. 2021. Т. 67. № 2. С. 84–92. [Avdeeva VA, Suplotova LA, Pigarova EA, Rozhinskaya LY, Troshina EA. Vitamin D deficiency in Russia: The first results of a registered, non-interventional study of the frequency of vitamin D deficiency and insufficiency in various geographic regions of the country. Problems of Endocrinology. 2021;67(2):84–92. (In Russ.)] <https://doi.org/10.14341/probl12736>
10. Яшин А. Н., Петров А. Н. Актуальность разработки обогащенных микроэлементами продуктов питания для диетотерапии при сердечно-сосудистых заболеваниях. Пищевые системы. 2023. Т. 6. № 3. С. 272–278. [Yashin AN, Petrov AN. The relevance of the development of food products enriched with trace elements for diet therapy in cardiovascular diseases. Food systems. 2023;6(3):272–278. (In Russ.)] <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2023-6-3-272-278>
11. Brown KH, Hess SY, Moore SE, Combs GF Jr, Cashman KD, et al. Neglected micronutrients-considering a broader set of vitamins and minerals in public health nutrition programs worldwide: A narrative review. The American Journal of Clinical Nutrition. 2025;122(3):680–694. <https://doi.org/10.1016/j.ajcnut.2025.06.030>
12. Olanbiwoninu A, Greppi A, Awotundun T, Adebayo EA, Spano G, et al. Microbial-based biofortification to mitigate African micronutrients deficiency: A focus on plant-based fermentation as source of B-group vitamins. Food Bioscience. 2023; 55:102996. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2023.102996>
13. Mariamenatu AH, Abdu EM. Overconsumption of Omega-6 polyunsaturated fatty acids (PUFAs) versus deficiency of Omega-3 PUFAs in modern-day diets: The disturbing factor for their “balanced antagonistic metabolic functions” in the human body. Journal of Lipids. 2021;2021(1):8848161. <https://doi.org/10.1155/2021/8848161>
14. Быкова О. В., Климов Ю. А., Тихонов С. В., Дарьина С. В. Дефицит полиненасыщенных жирных кислот и детская психоневрологическая заболеваемость. Медицинский Совет. 2020. № 18. С. 173–178. [Bykova OV, Klimov YA, Tikhonov SV, Darina SS. Polyunsaturated fatty acid deficiency and pediatric neuropsychiatric morbidity. Medical Council. 2020;(18):173–178. (In Russ.)] <https://doi.org/10.21518/2079-701X-2020-18-173-178>
15. Хабиб М. Д., Тюнькова В. В., Теплякова М. Ю. Основные тенденции в потреблении мясной продукции населением Российской Федерации. Вестник университета. 2025. № 6. С. 175–186 [Khabib MD, Tyunkova VV, Teplyakova MYu. Main trends in meat products consumption by the population of the Russian Federation. Vestnik Universiteta. 2025;6:175–186. (In Russ.)] <https://doi.org/10.26425/1816-4277-2025-6-175-186>
16. Федеральная служба государственной статистики. Потребление основных продуктов питания населением Российской Федерации. М.: Росстат, 2025. 14 с. [Federal state statistics service. Consumption of basic food products by the population of the Russian Federation. Moscow: Rosstat; 2025. 14 p. (In Russ.)]
17. Иванчиков А. О. Тенденции развития мирового рынка мясной продукции. Журнал монетарной экономики и менеджмента. 2024. № 12. С. 178–181. [Ivanchikov AO. Trends in the development of the global meat market. Journal of Monetary Economics and Management. 2024;12:178–181. (In Russ.)] <https://doi.org/10.26118/2782-4586.2024.81.63.172>
18. Гусаков Г. В., Жудро В. М., Шакель Т. П., Ёнчик Л. Т. Современные тенденции и перспективы развития рынка переработанной мясной продукции. Актуальные вопросы переработки мясного и молочного сырья. 2021. № 16. С. 7–12. [Gusakov GV, Zhudro VM, Shakel TP, Yonchik LT. Current trends and prospects for the development of the processed meat products market. Topical Issues of Processing of Meat and Milk Raw Materials. 2021;16:7–12. (In Russ.)] <https://doi.org/10.47612/2220-8755-2021-16-7-12>
19. Шейхова М. С., Сафонова С. Г. Тенденции развития потребительских предпочтений на рынке мяса и мясных продуктов. Московский экономический журнал. 2024. № 10. С. 10–24. [Sheyhova MS, Safonova SG. Trends in the development of consumer preferences in the meat and meat products market. Moscow Economic Journal. 2024;10:10–24. (In Russ.)] [https://doi.org/10.55186/2413046X\\_2024\\_9\\_10\\_394](https://doi.org/10.55186/2413046X_2024_9_10_394)
20. Godfray H CJ, Aveyard P, Garnett T, Hall JW, Key TJ, et al. Meat consumption, health, and the environment. Science. 2018;361(6399):eaam5324. <https://doi.org/10.1126/science.aam5324>
21. Зимняков В. М. Анализ производства колбасных изделий в России. Инновационная техника и технология. 2024. Т. 11. № 4. С. 48–54. [Zimnyakov VM. Analysis of sausage production in Russia. Innovative Machinery and Technology. 2024;11(4):48–54. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/PNDBUJ>
22. World Health Organization. Saturated fatty acid and trans-fatty acid intake for adults and children. Geneva: WHO; 2023. 114 p. URL: <https://www.who.int/publications/i/item/9789240073630>
23. Nuernberg K, Fischer K, Nuernberg G, Kuechenmeister U, Klosowska D, et al. Effects of dietary olive and linseed oil on lipid composition, meat quality, sensory characteristics and muscle structure in pigs. Meat Science. 2005;70(1):63–74. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2004.12.001>
24. Guo W, Wang H, Bai Y, Tan M. Global patent landscape of marine functional foods: Technological trends, hotspots, and future challenges. Trends in Food Science & Technology. 2026;169:105555. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2026.105555>
25. Das P, Dutta A, Panchali T, Khatun A, Kar R, et al. Advances in therapeutic applications of fish oil: A review. Measurement: Food. 2024;13:100142. <https://doi.org/10.1016/j.meafao.2024.100142>
26. Tortosa-Caparrós E, Navas-Carrillo D, Marín F, Orenes-Piñero E. Anti-inflammatory effects of omega 3 and omega 6 polyunsaturated fatty acids in cardiovascular disease and metabolic syndrome. Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 2017;57(16):3421–3429. <https://doi.org/10.1080/10408398.2015.1126549>

27. Mazaherioun M, Saedisomeolia A, Javanbakht MH, Koohdani F, Zarei M, *et al.* Long chain n-3 fatty acids improve depression syndrome in type 2 diabetes mellitus. *Iranian Journal of Public Health*. 2018;47(4):575–583.
28. Petersson S, Philippou E, Rodomar C, Nikiphorou E. The Mediterranean diet, fish oil supplements and Rheumatoid arthritis outcomes: Evidence from clinical trials. *Autoimmunity Reviews*. 2018;17(11):1105–1114. <https://doi.org/10.1016/j.autrev.2018.06.007>
29. Garg ML, Wood LG, Singh H, Moughan PJ. Means of delivering recommended levels of long chain n-3 polyunsaturated fatty acids in human diets. *Journal of Food Science*. 2006;71(5):66–71. <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2006.00033.x>
30. Simopoulos AP. The importance of the ratio of omega-6/omega-3 essential fatty acids. *Biomedicine & Pharmacotherapy*. 2002;56(8):365–379. [https://doi.org/10.1016/S0753-3322\(02\)00253-6](https://doi.org/10.1016/S0753-3322(02)00253-6)
31. МР 2.3.1.0253-21. Гигиена. Гигиена питания. Рациональное питание. Нормы физиологических потребностей в энергии и пищевых веществах для различных групп населения Российской Федерации. М.: Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека; 2021. 72 с. [MR 2.3.1.0253-21. Hygiene. Food hygiene. Rational nutrition. Norms of physiological needs for energy and nutrients for various population groups in the Russian Federation. Moscow: Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing; 2021. 72 p. (In Russ.)]
32. Попова А. Ю., Тутельян В. А., Никитюк Д. Б. О новых (2021) Нормах физиологических потребностей в энергии и пищевых веществах для различных групп населения Российской Федерации. *Вопросы питания*. 2021. Т 90. № 4. and nutrients of various groups of the population of the Russian Federation. *Problems of Nutrition*. 2021;90(4):6–19]. <https://doi.org/10.33029/0042-8833-2021-90-4-6-19>
33. Ушкалова В. Н. Стабильность липидов пищевых продуктов. М.: Агропромиздат, 1988. 152 с. [Ushkalova VN. Lipid stability of food products. Moscow: Agropromizdat; 1988. 152 p. (In Russ.)]
34. 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>
35. Torraco 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>
36. Park J, Rhee KS, Keeton JT, Rhee KC. Properties of low-fat frankfurters containing monounsaturated and omega-3 polyunsaturated oils. *The Journal of Food Science*. 1989;54(3):500–504. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1989.tb04637.x>
37. Derkach S, Kravets P, Kuchina Y, Glukharev A, Tyukina O, *et al.* Mineral-free biomaterials from mussel (*Mytilus edulis* L.) shells: Their isolation and physicochemical properties. *Food Bioscience*. 2023;56:103188. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2023.103188>
38. 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 AY, 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>
39. Wan M-C, Qin W, Lei C, Li Q-H, 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>
40. Liu Q-Y, Tan BKH. Dietary fish oil and vitamin E enhance doxorubicin effects in P388 tumor-bearing mice. *Lipids*. 2002;37(6):549–556. <https://doi.org/10.1007/s11745-002-0931-1>
41. Ghafoorunissa, Vani A, Laxmi R, Sesikanan B. Effects of dietary alpha-linolenic acid from blended oils on biochemical indices of coronary heart disease in Indians. *Lipids*. 2002;37(11):1077–1086. <https://doi.org/10.1007/s11745-002-1003-2>
42. Chapkin RS, Hong MY, Fan Y-Y, Davidson LA, Sanders LM, *et al.* Dietary n-3 PUFA alter colonocyte mitochondrial membrane composition and function. *Lipids*. 2002;37(2):193–199. <https://doi.org/10.1007/s11745-002-0880-8>
43. Ellulu MS, Khaza' ai H, Abed Y, Rahmat A, Ismail P, *et al.* Role of fish oil in human health and possible mechanism to reduce the inflammation. *Inflammopharmacology*. 2015;23(2–3):79–89. <https://doi.org/10.1007/s10787-015-0228-1>
44. Боева Н. П., Бредихина О. В., Петрова М. С., Баскакова Ю. А. Технология жиров из водных биологических ресурсов. М.: ВНИРО, 2016. 107 с. [Boeva NP, Bredikhina OV, Petrova MS, Baskakova YuA. Technology of fats from aquatic biological resources. Moscow: VNIRO; 2016. 107 p. (In Russ.)]
45. Шульгина Л. В., Павел К. Г., Солодова Е. А., Якуш Е. В. Пищевая и биологическая ценность пащтетных консервов из дальневосточной сардины *Sardinops melanostictus*. *Известия ТИНРО*. 2022. Т. 202. № 4. С. 957–969. [Shulgina LV, Pavel KG, Solodova EA, Yakush EV. Nutritional and biological value of canned pate from Japanese sardine *Sardinops melanostictus*. *Proceedings of TINRO*. 2022;202(4):957–969. (In Russ.)] <https://doi.org/10.26428/1606-9919-2022-202-957-969>
46. Шульгина Л. В., Давлетшина Т. А., Павловский А. М., Солодова Е. А., Павел К. Г., и др. Консервы из сайры тихоокеанской – источник полиненасыщенных жирных кислот семейства омега-3. *Известия ТИНРО*. 2017. № 191. С. 235–242. [Shulgina LV, Davletshina TA, Pavlovsky AM, Solodova EA, Pavel' KG, Yakush EV. Canned goods from pacific saury – a source of polyunsaturated fatty acids of the omega-3 family. *Proceedings of TINRO*. 2017;191(4):235–242. (In Russ.)] <https://doi.org/10.26428/1606-9919-2017-191-235-242>
47. Куприна Е. Э., Гришина Е. С., Яркола А. Н., Мануйлов А. Н., Демидов П. И., Ивненко Ю. Г. Разработка технологии получения эссенциальных жирных кислот из гидролизатов рыб повышенной жирности. *Вестник Российской*

- военно-медицинской академии. 2021. Т. 23. № 2. С. 119–130. [Kuprina EE, Grishina ES, Yakkola AN, Manuilov AN, Demidov PI, Ivnenko YG. Development of technology for producing essential fatty acids from hydrolysates of high-fat fish. Bulletin of the Russian Military Medical Academy. 2021;23(2):119–130. (In Russ.)] <https://doi.org/10.17816/brmma58206>
48. Шульгина Л. В., Якуш Е. В., Давлетшина Т. А., Павловский А. М., Павел К. Г. и др. Полиненасыщенные жирные кислоты семейства омега-3 в продукции из дальневосточных рыб. Здоровье. Медицинская экология. Наука. 2017. № 5. С. 42–45. [Shulgina LV, Yakush EV, Davletshina TA, Pavlovskiy AM, Pavel' KG, et al. Polyunsaturated fatty acids of omega-3 in foods from far eastern fish. Health. Medical Ecology. Science. 2017;(5):42–45. (In Russ.)] <https://doi.org/10.5281/zenodo.1115456>
49. Weichselbaum E, Coe S, Buttriss J, Stanner S. Fish in the diet: A review. Nutrition Bulletin. 2013;38(2):128–177. <https://doi.org/10.1111/nbu.12021>
50. Raatz S, Bibus D. Fish and fish oil in health and disease prevention. San Diego: Academic Press; 2016. 380 p.
51. Harlina PW, Nasution AY, Musfiroh I, Muchtaridi M, Geng F, et al. A sustainable source of freshwater fish oil: Nutritional and functional insights through lipidomics and metabolomics. LWT – Food Science and Technology. 2026;241:119046. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2026.119046>
52. Rodrigues M, Rosa A, Almeida A, Martins R, Ribeiro TÂ, et al. Omega-3 fatty acids from fish by-products: Innovative extraction and application in food and feed. Food and Bioproducts Processing. 2024;145:32–41. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2024.02.007>
53. Korma SA, Rehman A, Hussain A, Kauser S, Firdous N, et al. Valorization of fish oil from processing by-products: Composition, nutritional value, and potential applications. Applied Food Research. 2025;5(2):101552. <https://doi.org/10.1016/j.afres.2025.101552>
54. Нугманов А. Х.-Х., Золотовская О. В., Алексанян И. Ю., Пащенко К. П., Котельников А. В. Экспериментальное определение количества рыбьего жира в отходах толстолобика. Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания. 2023. № 2. С. 140–146. [Nugmanov AH-Kh, Zolotovskaya OV, Aleksanyan IYu, Pashchenko KP, Kotelnikov AV. Experimental determination of the amount of fish oil in carp waste. Technologies of the food and processing industry of AIC – Healthy Food. 2023;(2):140–146. (In Russ.)] <https://doi.org/10.24412/2311-6447-2023-2-140-146>
55. Мукатова М. Д., Киричко Н. А., Моисеенко М. С., Сколков С. А. Разработка технологии получения жира из жиродержащих отходов переработки промысловых рыб Волжско-Каспийского бассейна. Известия ТИПРО. 2018. № 193. С. 211–222. [Mukatova MD, Kirichko NA, Moiseenko MS, Skolkov SA. Development of technology for oil extraction from fat-containing wastes of fish processing in the Volga-Caspian Basin. Proceedings of TINRO. 2018;(193):211–222. (In Russ.)] <https://doi.org/10.26428/1606-9919-2018-193-211-222>
56. Артемова А. Г. Технология получения жира пищевого из голов лососевых рыб ферментативным способом. Вестник биотехнологии и физико-химической биологии им. Ю. А. Овчинникова. 2013. Т. 9. № 2. С. 9–16. [Artemova AG. Technology for enzymatically producing edible fat from the heads of salmon. Yu.A. Ovchinnikov bulletin of biotechnology and physical and chemical biology. 2013;9(2):9–16. (In Russ.)]
57. Захаренко А. М., Кириченко К. Ю., Вахнюк И. А., Голохваст К. С. Применение технологии сверхкритической экстракции для получения полиненасыщенных кислот из морской звезды (*Lysastrosoma anthosticta* Fisher, 1922). Техника и технология пищевых производств. 2022. Т. 51. № 4. С. 753–758. [Zakharenko A, Kirichenko K, Vakhniuk I, Golokhvast K. Supercritical extraction technology of obtaining polyunsaturated acids from starfish (*Lysastrosoma anthosticta* Fisher, 1922). Food Processing: Techniques and Technology. 2022;51(4):753–758. (In Russ.)] <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-4-753-758>
58. Ivanovs K, Blumberga D. Extraction of fish oil using green extraction methods: a short review. Energy Procedia. 2017;128:477–483. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.033>
59. Ozogul Y, Ucar Y, Takadaş F, Durmus M, Köşker AR, et al. Comparison of green and conventional extraction methods on lipid yield and fatty acid profiles of fish species. European Journal of Lipid Science and Technology. 2018;120(12):1800107. <https://doi.org/10.1002/ejlt.201800107>
60. Сафронова Т. М., Дацун В. М., Максимова С. Н. Сырье и материалы рыбной промышленности. Санкт-Петербург: Лань, 2022. 336 с. [Safronova TM, Datsun VM, Maksimova SN. Raw materials and materials of the fish industry. Saint Petersburg: Lan; 2022. 336 p. (In Russ.)]
61. Константинова Л. Л., Двинин Ю. Ф., Лебская Т. К., Кузьмина В. И. Технохимические свойства промысловых рыб Северной Атлантики и прилегающих морей Северного Ледовитого океана. Мурманск: ПИНРО, 1997. 183 с. [Konstantinova LL, Dvinin YuF, Lebskaya TK, Kuzmina VI. Technological and chemical properties of commercial fish from the North Atlantic and adjacent seas of the Arctic Ocean. Murmansk: PINRO; 1997. 183 p. (In Russ.)]
62. Шульгина Л. В., Давлетшина Т. А., Павловский А. М., Солодова Е. А., Павел К. Г. Состав липидов и жирных кислот в мышечной ткани японской скумбрии *Scomber japonicus*. Известия ТИПРО. 2019. № 196. С. 193–203. [Shulgina L.V., Davletshina T.A., Pavlovsky A.M., Solodova E.A., Pavel K.G. Composition of lipids and fatty acids in muscle tissue of chub mackerel *Scomber japonicus*. Proceedings of TINRO. 2019;(196):193–203. (In Russ.)] <https://doi.org/10.26428/1606-9919-2019-196-193-203>

63. Громыко М. А., Шульгина Л. В. Печень кеты в технологии консервов для диетического профилактического питания. Национальная ассоциация ученых. 2017. №7. С. 17–20. [Gromyko MA, Shulgina L. V. Chum salmon liver in the technology of canned products for dietary preventive nutrition. National Association of Scientists. 2017;(7):17–20. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/YNPACA>
64. Ржавская Ф. М. Жиры рыб и морских млекопитающих. М.: Пищевая промышленность, 1976. 470 с. [Rzhavskaya FM. Fats of fish and marine mammals. Moscow: Food Industry; 1976. 470 p. (In Russ.)]
65. Iverson JL. Fatty acid composition of cod liver oil determined by urea fractionation and modified programmed temperature gas chromatography. *Journal of Association of Official Analytical Chemists*. 1970;53(5):1074–1079. <https://doi.org/10.1093/jaoac/53.5.1074>
66. Гроховский В. А., Волченко В. И., Глухарев А. Ю., Несвященко С. С. Новое в технологии пищевой продукции с использованием печеночного сырья из водных биоресурсов. Мурманск: МГТУ, 2021. 92 с. [Grokhovsky V. A., Volchenko V. I., Glukharev A. Yu., Nesvyashchenko S. S. New developments in food technology using liver raw materials from aquatic biological resources. Murmansk: Murmansk State Technical University; 2021. 92 p. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/BLUDAE>
67. Park Y, Harris W. EPA, but not DHA, decreases mean platelet volume in normal subjects. *Lipids*. 2002;37(10):941–946. <http://doi.org/10.1007/s11745-006-0984-1>
68. Schunck W-H, Konkel A, Fischer R, Weylandt K-H. Therapeutic potential of omega-3 fatty acid-derived epoxyeicosanoids in cardiovascular and inflammatory diseases. *Pharmacology & Therapeutics*. 2018;183:177–204. <https://doi.org/10.1016/j.pharmthera.2017.10.016>
69. Sinclair AJ, Attar-Bashi NM, Li D. What is the role of alpha-linolenic acid for mammals? *Lipids*. 2002;37(12):1113–1123. <https://doi.org/10.1007/s11745-002-1008-x>
70. Marventano S, Kolacz P, Castellano S, Galvano F, Buscemi S, Mistretta A, et al. A review of recent evidence in human studies of n-3 and n-6 PUFA intake on cardiovascular disease, cancer, and depressive disorders: does the ratio really matter? *International Journal of Food Sciences and Nutrition*. 2015;66(6):611–622. <https://doi.org/10.3109/09637486.2015.1077790>
71. Peter S, Chopra S, Jacob JJ. A fish a day, keeps the cardiologist away! – A review of the effect of omega-3 fatty acids in the cardiovascular system. *Indian Journal of Endocrinology and Metabolism*. 2013;17(3):422–429. <https://doi.org/10.4103/2230-8210.111630>
72. von Schacky C. The role of omega-3 fatty acids in cardiovascular disease. *Current Atherosclerosis Reports*. 2003;5(2):139–145. <https://doi.org/10.1007/s11883-003-0086-y>
73. Andriambelo B, Stiffel M, Roke K, Plourde M. New perspectives on randomized controlled trials with omega-3 fatty acid supplements and cognition: A scoping review. *Ageing Research Reviews*. 2023;85:101835. <https://doi.org/10.1016/j.arr.2022.101835>
74. Wesołowska W, Bachoń E, Doligalska M, Stremel A, Leszyńska A, et al. Omega-3 fatty acids: Key players in cognitive function and brain health. *Journal of Education, Health and Sport*. 2025;77:56776. <https://doi.org/10.12775/JEHS.2025.77.56776>
75. Chitre NM, Moniri NH, Murnane KS. Omega-3 fatty acids as druggable therapeutics for neurodegenerative disorders. *CNS & Neurological Disorders – Drug Targets*. 2019;18(10):735–749. <https://doi.org/10.2174/1871527318666191114093749>
76. Kolanowski W, Laufenberg G. Enrichment of food products with polyunsaturated fatty acids by fish oil addition. *European Food Research and Technology*. 2006;222(3):472–477. <https://doi.org/10.1007/s00217-005-0089-8>
77. Smith WL, Murphy RC. The eicosanoids: Cyclooxygenase, lipoxygenase and epoxygenase pathways. In: Ridgway ND, McLeod RS, editors. *Biochemistry of lipids, lipoproteins and membranes*. Netherlands: Elsevier; 2016. p. 259–296. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63438-2.00009-2>
78. Alvarez M de L, Lorenzetti F. Role of eicosanoids in liver repair, regeneration and cancer. *Biochemical Pharmacology*. 2021;192:114732. <https://doi.org/10.1016/j.bcp.2021.114732>
79. Каратеев А. Е., Алейникова Т. Л. Эйкозаноиды и воспаление. Современная ревматология. 2016. Т. 10. № 4. С. 73–86. [Karateev AE, Aleinikova TL. Eicosanoids and inflammation. *Modern Rheumatology Journal*. 2016;10(4):73–86. (In Russ.)] <https://doi.org/10.14412/1996-7012-2016-4-73-86>
80. Civelek E, Ozen G. The biological actions of prostanoids in adipose tissue in physiological and pathophysiological conditions. *Prostaglandins, Leukotrienes and Essential Fatty Acids*. 2022;186:102508. <https://doi.org/10.1016/j.plefa.2022.102508>
81. Kaul N, Kreml R, Austria JA, Richard MN, Edel AL, et al. A comparison of fish oil, flaxseed oil and hempseed oil supplementation on selected parameters of cardiovascular health in healthy volunteers. *Journal of the American College of Nutrition*. 2008;27(1):51–58. <https://doi.org/10.1080/07315724.2008.10719674>
82. Harris WS, Pottala JV, Sands SA, Jones PG. Comparison of the effects of fish and fish-oil capsules on the n-3 fatty acid content of blood cells and plasma phospholipids. *The American Journal of Clinical Nutrition*. 2007;86(6):1621–1625. <https://doi.org/10.1093/ajcn/86.5.1621>
83. DeFina LF, Marcoux LG, Devers SM, Cleaver JP, Willis BL. Effects of omega-3 supplementation in combination with diet and exercise on weight loss and body composition. *The American Journal of Clinical Nutrition*. 2011;93(2):455–462. <https://doi.org/10.3945/ajcn.110.002741>



84. Salman HB, Salman MA, Yildiz Akal E. The effect of omega-3 fatty acid supplementation on weight loss and cognitive function in overweight or obese individuals on weight-loss diet. *Nutrición Hospitalaria*. 2022;39(4):803–813. <https://doi.org/10.20960/nh.03992>
85. Azhar W, Qadhi A, Abusudah W, Ghabashi M, Aljaadi AM, et al. The effects of omega-3 supplementation on stress, anxiety, depression, sleep quality, and everyday memory in individuals with psychological distress: A randomized, double-blind, placebo-controlled trial. *Journal of Affective Disorders*. 2026;399:121055. <https://doi.org/10.1016/j.jad.2025.121055>
86. Yari MG, Ghasemi-Tehrani H, Feizi A, Ziaei R, Derakhshan M, et al. Effect of a pro-fertility diet combined with omega-3 supplementation on embryo quality in infertile women undergoing *in vitro* fertilization: Randomized controlled trial. *Reproductive BioMedicine Online*. 2026;105661. <https://doi.org/10.1016/j.rbmo.2026.105661>
87. Olsen SF, Secher NJ. Low consumption of seafood in early pregnancy as a risk factor for preterm delivery: Prospective cohort study. *The BMJ*. 2002;324(7335):447. <https://doi.org/10.1136/bmj.324.7335.447>
88. Тутельян В. А., Никитюк Д. Б. Эпидемиология питания: Россия 2018–2023. М.: ДеЛи, 2024. 270 с. [Tutelyan VA, Nikityuk DB. Nutrition epidemiology: Russia 2018–2023. Moscow: DeLi; 2024. 270 p. (In Russ.)]
89. Petracci M, Bianchi M, Cavani C. Development of rabbit meat products fortified with n-3 polyunsaturated fatty acids. *Nutrients*. 2009;1(2):111–118. <https://doi.org/10.3390/nu1020111>
90. World Health Organization. Diet, nutrition, and the prevention of chronic diseases. Geneva, WHO; 2003. 149 p.
91. Kris-Etherton PM, Harris WS, Appel LJ, American Heart Association. Nutrition Committee. Fish consumption, fish oil, omega-3 fatty acids, and cardiovascular disease. *Circulation*. 2002;106(21):2747–2757. <https://doi.org/10.1161/01.CIR.0000038493.65177.94>
92. Бирюкова Т. В., Чутчева Ю. В., Ашмарина Т. И., Ягудаева Н. А. Тенденции развития производства и потребления мяса и мясной продукции в современных условиях. *Известия Международной академии аграрного образования*. 2022. № 63. С. 73–78. [Biryukova TV, Chutcheva YuV, Ashmarina TI, Yagudaeva NA. Trends in the development of production and consumption of meat and meat products in modern conditions. *International Journal of Agrarian Science and Education*. 2022;63:73–78. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/SHVOLL>
93. Wood JD, Richardson RI, Nute GR, Fisher AV, Campo MM, et al. Effects of fatty acids on meat quality: A review. *Meat Science*. 2004;66(1):21–32. [https://doi.org/10.1016/S0309-1740\(03\)00022-6](https://doi.org/10.1016/S0309-1740(03)00022-6)
94. López-Pedrouso M, Lorenzo JM, Gullón B, Campagnol PCB, Franco D. Novel strategy for developing healthy meat products replacing saturated fat with oleogels. *Current Opinion in Food Science*. 2021;40:40–45. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2020.06.003>
95. Scollan ND, Price EM, Morgan SA, Huws SA, Shingfield KJ. Can we improve the nutritional quality of meat? *Proceedings of the Nutrition Society*. 2017;76(4):603–618. <https://doi.org/10.1017/S0029665117001112>
96. Araujo de Vizcarrondo C, Carrillo de Padilla F, Martín E. Fatty acid composition of beef, pork, and poultry fresh cuts, and some of their processed products. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición*. 1998;48(4):354–358.
97. Josquin NM, Linssen JPH, Houben JH. Quality characteristics of Dutch-style fermented sausages manufactured with partial replacement of pork back-fat with pure, pre-emulsified or encapsulated fish oil. *Meat Science*. 2012;90(1):81–86. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2011.06.001>
98. Jiménez-Colmenero F, Triki M, Herrero AM, Rodríguez-Salas L, Ruiz-Capillas C. Healthy oil combination stabilized in a konjac matrix as pork fat replacement in low-fat, PUFA-enriched, dry fermented sausages. *LWT – Food Science and Technology*. 2013;51(1):158–163. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2012.10.016>
99. Lorenzo JM, Munekata PES, Pateiro M, Campagnol PCB, Domínguez R. Healthy Spanish *salchichón* enriched with encapsulated n-3 long chain fatty acids in konjac glucomannan matrix. *Food Research International*. 2016;89(1):289–295. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2016.08.012>
100. Cáceres E, García ML, Selgas MD. Effect of pre-emulsified fish oil – as source of PUFA n-3 – on microstructure and sensory properties of *mortadella*, a Spanish bologna-type sausage. *Meat Science*. 2008;80(2):183–193. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2007.11.018>
101. Damerau A, Ogródowska D, Banaszczyk P, Dajnowiec F, Tańska M, et al. Baltic herring (*Clupea harengus membras*) oil encapsulation by spray drying using a rice and whey protein blend as a coating material. *Journal of Food Engineering*. 2022;314:110769. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2021.110769>
102. Sahena F, Zaidul ISM, Jinap S, Yazid AM, Khatib A, et al. Fatty acid compositions of fish oil extracted from different parts of Indian mackerel (*Rastrelliger kanagurta*) using various techniques of supercritical CO<sub>2</sub>-extraction. *Food Chemistry*. 2010;120(3):879–885. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2009.10.055>
103. Lei Q, Ba S, Zhang H, Wei Y, Lee JY, et al. Enrichment of omega-3 fatty acids in cod liver oil via alternate solvent winterization and enzymatic interesterification. *Food Chemistry*. 2016;199:364–371. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.12.005>
104. Morales-Medina R, De León G, Munio M, Guadix A, Guadix E. Mass transfer modeling of sardine oil polyunsaturated fatty acid (PUFA) concentration by low temperature crystallization. *Journal of Food Engineering*. 2016;183:16–23. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2016.03.009>

105. Jacobsen C, Warncke SA, Hansen SH, Sørensen A-DM. Fish liver discards as a source of long-chain omega-3 polyunsaturated fatty acids. *Foods*. 2022;11(7):905. <https://doi.org/10.3390/foods11070905>
106. Clonan A, Roberts KE, Holdsworth M. Socioeconomic and demographic drivers of red and processed meat consumption: Implications for health and environmental sustainability. *Proceedings of the Nutrition Society*. 2016;75(3):367–373. <https://doi.org/10.1017/S0029665116000100>
107. Bryhni EA, Kjos NP, Ofstad R, Hunt M. Polyunsaturated fat and fish oil in diets for growing-finishing pigs: Effects on fatty acid composition and meat, fat, and sausage quality. *Meat Science*. 2002;62(1):1–8. [https://doi.org/10.1016/s0309-1740\(01\)00211-x](https://doi.org/10.1016/s0309-1740(01)00211-x)
108. Bourre JM. Where to find omega-3 fatty acids and how feeding animals with diet enriched in omega-3 fatty acids to increase nutritional value of derived products for human: What is actually useful? *The Journal of Nutrition, Health and Aging*. 2005;9(4):232–242.
109. Jiménez-Colmenero F. Healthier lipid formulation approaches in meat-based functional foods. Technological options for replacement of meat fats by non-meat fats. *Trends in Food Science & Technology*. 2007;18(11):567–578. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2007.05.006>
110. Delgado-Pando G, Cofrades S, Ruiz-Capillas C, Jiménez-Colmenero F. Healthier lipid combination as functional ingredient influencing sensory and technological properties of low-fat frankfurters. *European Journal of Lipid Science & Technology*. 2010;112(8):859–870. <https://doi.org/10.1002/ejlt.201000076>
111. Lonergan SM, Topel DG, Marple DN. Sausage processing and production. The science of animal growth and meat technology. Netherlands: Elsevier; 2019. p. 229–253. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815277-5.00014-7>
112. Bou R, Cofrades S, Jiménez-Colmenero F. Fermented meat sausages. In: Frias J, Martinez-Villaluenga C, Peñas E, editors. *Fermented foods in health and disease prevention*. Netherlands: Elsevier; 2017. p. 203–235. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802309-9.00010-8>
113. Solomando JC, Antequera T, Perez-Palacios T. Evaluating the use of fish oil microcapsules as omega-3 vehicle in cooked and dry-cured sausages as affected by their processing, storage and cooking. *Meat Science*. 2020;162:108031. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2019.108031>
114. Solomando JC, Antequera T, Martín A, Perez-Palacios T. Effect of omega-3 microcapsules addition on the profile of volatile compounds in enriched dry-cured and cooked sausages. *Foods*. 2020;9(11):1683. <https://doi.org/10.3390/foods9111683>
115. Valencia I, Ansorena D, Astiasarán I. Nutritional and sensory properties of dry fermented sausages enriched with n-3 PUFAs. *Meat Science*. 2006;72(4):727–733. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2005.09.022>
116. Pelser WM, Linssen JPH, Legger A, Houben JH. Lipid oxidation in n-3 fatty acid enriched Dutch style fermented sausages. *Meat Science*. 2007;75(1):1–11. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2006.06.007>
117. Muguerza E, Ansorena D, Astiasaran I. Functional dry fermented sausages manufactured with high levels of n-3 fatty acids: Nutritional benefits and evaluation of oxidation. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2004;84(9):1061–1068. <https://doi.org/10.1002/jsfa.1786>
118. Marchetti L, Andrés SC, Califano AN. Low-fat meat sausages with fish oil: Optimization of milk proteins and carrageenan contents using response surface methodology. *Meat Science*. 2014;96(3):1297–1303. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2013.11.004>
119. Delgado-Pando G, Cofrades S, Ruiz-Capillas C, Solas MT, Triki M, *et al.* Low-fat frankfurters formulated with a healthier lipid combination as functional ingredient: microstructure, lipid oxidation, nitrite content, microbiological changes and biogenic amine formation. *Meat Science*. 2011;89(1):65–71. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2011.03.022>
120. Волченко В. И., Ирлица Е. Л., Глухарев А. Ю. Разработка нового вида вареных колбасных изделий с добавлением рыбного сырья. *Вестник МГТУ*. 2017. Т. 20. № 3. С. 572–581. [Volchenko VI, Irlitsa EL, Glukharev AYU. Development of a new type of boiled sausage products with the addition of fish raw material. *Bulletin of MSTU*. 2017;20(3):572–581. (In Russ.)] <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2017-20-3-572-581>
121. Волченко В. И., Дворянкина К. В. Изучение возможности использования свиного сердца при изготовлении колбасных изделий. *Вестник Международной академии холода*. 2019. № 1. С. 77–83. [Volchenko VI, Dvoryankina KV. The possibility of using pork heart in the manufacture of sausages. *Bulletin of the International Academy of Refrigeration*. 2019;(1):77–83. (In Russ.)] <https://doi.org/10.17586/1606-4313-2019-18-1-77-83>
122. Цикин С. С. *Технология продуктов из нетрадиционного мясного сырья*. М.: Юрайт, 2021. 149 с. [Tsikin SS. *Technology of Products Made from Non-Traditional Meat Raw Materials*. Moscow: Yurayt; 2021. 149 p. (In Russ.)]
123. Волченко В. И., Глухарев А. Ю. Оптимизация рецептурного состава нового вида вареных колбасных изделий с добавлением рыбного сырья. *Научные труды Дальрыбвтуза*. 2017. Т. 43. № 4. С. 48–61. [Volchenko VI, Glukharev AYU. Optimization of the recipe composition of a new kind of baked sausage product with addition of fish raw materials. *Scientific Journal of the Far Eastern State Technical Fisheries University*. 2017;43(4):48–61. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/YQLEHM>
124. Marchetti L, Argel N, Andrés SC, Califano AN. Sodium-reduced lean sausages with fish oil optimized by a mixture design approach. *Meat Science*. 2015;104:67–77. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2015.02.005>
125. Solomando JC, Antequera T, Perez-Palacios T. Lipid digestion products in meat derivatives enriched with fish oil microcapsules. *Journal of Functional Foods*. 2020;68:103916. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2020.103916>

126. Sampels S, Zajic T, Mraz J. Increasing the omega-3 content of traditional meat products by the addition of an underutilised by-product from fish processing. *Czech Journal of Food Sciences*. 2015;33(5):431–440. <http://doi.org/10.17221/35/2015-CJFS>
127. Salminen H, Herrmann K, Weiss J. Oil-in-water emulsions as a delivery system for n-3 fatty acids in meat products. *Meat Science*. 2013;93(3):659–667. <https://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2012.11.035>
128. O'Brien RD. *Fats and oils: Formulating and processing for applications*. Boca Raton: CRC Press; 2003. 616 p.
129. Solomando JC, Antequera T, Martín A, Perez-Palacios T. Fish oil microcapsules as omega-3 enrichment strategy: Changes in volatile compounds of meat products during storage and cooking. *Foods*. 2021;10(4):745. <https://doi.org/10.3390/foods10040745>
130. Raeisi S, Ojagh SM, Pourashouri P, Salaün F, Quek SY. Shelf-life and quality of chicken nuggets fortified with encapsulated fish oil and garlic essential oil during refrigerated storage. *Journal of Food Science and Technology*. 2021;58(1):121–128. <http://doi.org/10.1007/s13197-020-04521-3>
131. Domínguez R, Pateiro M, Sichert Munekata PE, Bastianello Campagnol PC, Lorenzo JM. Influence of partial pork backfat replacement by fish oil on nutritional and technological properties of liver pâté. *European Journal of Lipid Science and Technology*. 2017;119:1600178. <https://doi.org/10.1002/ejlt.201600178>
132. Kawecki K, Stangierski J, Konieczny P. An analysis of oxidative changes and the fatty acid profile in stored poultry sausages with liquid and microencapsulated fish oil additives. *Molecules*. 2021;26(14):4293. <https://doi.org/10.3390/molecules26144293>
133. Lee S, Faustman C, Djordjevic D, Faraji H, Decker EA. Effect of antioxidants on stabilization of meat products fortified with n-3 fatty acids. *Meat Science*. 2006;72(1):18–24. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2005.05.022>
134. Miyashita K, Uemura M, Hosokawa M. Effective prevention of oxidative deterioration of fish oil: Focus on flavor deterioration. *Annual Review of Food Science and Technology*. 2018;9(1):209–226. <https://doi.org/10.1146/annurev-food-030117-012320>
135. Drusch S, Groß N, Schwarz K. Efficient stabilization of bulk fish oil rich in long-chain polyunsaturated fatty acids. *European Journal of Lipid Science and Technology*. 2008;110(4):351–359. <https://doi.org/10.1002/ejlt.200700195>
136. Гуринович Г. В., Патракова И. С., Кудряшов Л. С. Исследование влияния состава посолочных смесей на процесс окисления липидов мясных систем. *Техника и технология пищевых производств*. 2018. № 1. С. 31–40. [Gurinovich GV, Patrakova IS, Kudryashov LS. Study of the effect of curing mixture compositions on oxidation of lipids in meat systems. *Food Processing: Techniques and Technology*. 2018;(1):31–40. (In Russ.)] <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2018-1-31-40>
137. Delgado-Pando G, Cofrades S, Ruiz-Capillas C, Teresa Solas M, Jiménez-Colmenero F. Healthier lipid combination oil-in-water emulsions prepared with various protein systems: An approach for development of functional meat products. *European Journal of Lipid Science and Technology*. 2010;112(7):791–801. <https://doi.org/10.1002/ejlt.200900234>
138. Holt C, Roginski H. Milk proteins: Biological and food aspects of structure and function. In: Sikorski ZE, editor. *Chemical and functional properties of food proteins*. Boca Raton: CRC Press; 2001. p. 271–334. <https://elibrary.ru/RHEAYV>
139. Peng J, Zhang W, Zi Y, Shi C, Kan G, et al. Fish oil encapsulation by genipin-crosslinked complex coacervation between gelatin and different anionic polysaccharides. *Food Hydrocolloids*. 2024;152:109945. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2024.109945>
140. Delgado-Pando G, Cofrades S, Rodríguez-Salas L, Jiménez-Colmenero F. A healthier oil combination and konjac gel as functional ingredients in low-fat pork liver pâté. *Meat Science*. 2011;88(2):241–248. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2010.12.028>
141. Domínguez R, Pateiro M, Agregán R, Lorenzo JM. Effect of the partial replacement of pork backfat by microencapsulated fish oil or mixed fish and olive oil on the quality of frankfurter type sausage. *Journal of Food Science and Technology*. 2017;54(1):26–37. <https://doi.org/10.1007/s13197-016-2405-7>
142. Timilsena YP, Wang B, Adhikari R, Adhikari B. Advances in microencapsulation of polyunsaturated fatty acids (PUFAs)-rich plant oils using complex coacervation: A review. *Food Hydrocolloids*. 2017;69:369–381. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2017.03.007>
143. Wang B, Vongsvivut J, Adhikari B, Barrow CJ. Microencapsulation of tuna oil fortified with the multiple lipophilic ingredients vitamins A, D3, E, K2, curcumin and coenzyme Q10. *Journal of Functional Foods*. 2015;19:893–901. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2015.03.027>
144. Beindorff CM, Zuidam NJ. Microencapsulation of fish oil. In: Zuidam NJ, Nedovic V, editors. *Encapsulation technologies for active food ingredients and food processing*. New York: Springer; 2009. p. 161–185. [https://doi.org/10.1007/978-1-4419-1008-0\\_6](https://doi.org/10.1007/978-1-4419-1008-0_6)
145. Barrow CJ, Nolan C, Jin Y. Stabilization of highly unsaturated fatty acids and delivery into foods. *Lipid Technology*. 2007;19(5):108–111. <https://doi.org/10.1002/lite.200600037>
146. Zhang W, Yan C, May J, Barrow CJ. Whey protein and gum arabic encapsulated omega-3 lipids: The effect of material properties on coacervation. *Agro FOOD Industry Hi Tech*. 2009;20(4):18–21.
147. Xia Q, Wang B, Akanbi TO, Li R, Yang W, et al. Microencapsulation of lipase produced omega-3 concentrates resulted in complex coacervates with unexpectedly high oxidative stability. *Journal of Functional Foods*. 2017;35:499–506. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2017.06.017>

148. Muhoza B, Xia S, Wang X, Zhang X, Li Y, *et al.* Microencapsulation of essential oils by complex coacervation method: Preparation, thermal stability, release properties and applications. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2022;62(5):1363–1382. <https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1843132>
149. Elzoghby AO. Gelatin-based nanoparticles as drug and gene delivery systems: Reviewing three decades of research. *Journal of Controlled Release*. 2013;172(3):1075–1091. <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2013.09.019>
150. Heckert Bastos LP, Vicente J, Corrêa dos Santos CH, Geraldo de Carvalho M, Garcia-Rojas EE. Encapsulation of black pepper (*Piper nigrum* L.) essential oil with gelatin and sodium alginate by complex coacervation. *Food Hydrocolloids*. 2020;102:105605. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.105605>
151. Muhoza B, Xia S, Cai J, Zhang X, Duhoranimana E, *et al.* Gelatin and pectin complex coacervates as carriers for cinnamaldehyde: Effect of pectin esterification degree on coacervate formation, and enhanced thermal stability. *Food Hydrocolloids*. 2019;87:712–722. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2018.08.051>
152. Muhoza B, Xia S, Zhang X. Gelatin and high methyl pectin coacervates crosslinked with tannic acid: The characterization, rheological properties, and application for peppermint oil microencapsulation. *Food Hydrocolloids*. 2019;97:105174. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.105174>
153. Carlos Solomando J, Vázquez F, Antequera T, Folgado C, Perez-Palacios T. Addition of fish oil microcapsules to meat products – implications for omega-3 enrichment and salt reduction. *Journal of Functional Foods*. 2023;105:105575. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2023.105575>
154. Jiménez-Martín E, Antequera Rojas T, Gharsallaoui A, Ruiz Carrascal J, Pérez-Palacios T. Fatty acid composition in double and multilayered microcapsules of  $\omega$ -3 as affected by storage conditions and type of emulsions. *Food Chemistry*. 2016;194:476–486. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.08.046>
155. Solomando JC, Antequera T, Ruiz-Carrascal J, Perez-Palacios T. Improvement of encapsulation and stability of EPA and DHA from monolayered and multilayered emulsions by high-pressure homogenization. *Journal of Food Processing and Preservation*. 2020;44:14290. <https://doi.org/10.1111/jfpp.14290>
156. Коденцова В. М. Градации уровней потребления витаминов: возможные риски при чрезмерном потреблении. *Вопросы питания*. 2014. Т. 83. № 3. С. 41–51. [Kodentsova VM. Gradation in the level of vitamin consumption: Possible risk of excessive consumption. *Problems of nutrition*. 2014;83(3):41–51. (In Russ.)] <https://doi.org/10.24411/0042-8833-2014-00028>
157. Swanson D, Block R, Mousa SA. Omega-3 fatty acids EPA and DHA: Health benefits throughout life. *Advances in Nutrition*. 2012;3(1):1–7. <https://doi.org/10.3945/an.111.000893>

#### Дополнительная информация об авторах / Additional information about the authors

Глухарев Андрей Юрьевич / Andrei Yu. Glukharev ORCID 0000-0002-6083-546X; eLIBRARY SPIN 8485-0558  
Волченко Василий Игоревич / Vasily I. Volchenko ORCID 0000-0001-6454-7919; eLIBRARY SPIN 2505-1928  
Гроховский Владимир Александрович / Vladimir A. Grokhovsky ORCID 0000-0002-1892-0257; eLIBRARY SPIN 5171-8885  
Колотова Дарья Сергеевна / Daria S. Kolotova ORCID 0000-0002-1700-2323; eLIBRARY SPIN 3803-6815



<https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-3-2661>  
<https://elibrary.ru/NSMNBX>

Оригинальная статья  
<https://fptt.ru>

## Спектральные маркеры деградации липидного профиля сухого цельного молока при хранении



И. А. Барковская\*, П. И. Королёва, А. В. Косарева,  
С. Н. Туровская, Е. Е. Рыбакова, В. Ю. Ярышев,  
Е. А. Юрова, В. К. Семипятный, А. Г. Галстян

Всероссийский научно-исследовательский институт молочной промышленности, Москва, Россия

Поступила в редакцию: 01.06.2026

Принята после рецензирования: 24.08.2026

Принята к публикации: 01.09.2026

\*e-mail: [i\\_barkovskaya@vniimi.org](mailto:i_barkovskaya@vniimi.org)

© И. А. Барковская, П. И. Королёва, А. В. Косарева,  
С. Н. Туровская, Е. Е. Рыбакова, В. Ю. Ярышев, Е. А. Юрова,  
В. К. Семипятный, А. Г. Галстян, 2026



### Аннотация.

Сухое цельное молоко – один из наиболее востребованных молочных ингредиентов благодаря своей высокой пищевой ценности, длительным срокам хранения и широкому спектру функционально-технологических свойств. Однако наличие значительной доли липидной фракции в продукте обуславливает его высокую чувствительность к процессам окислительной и гидролитической порчи, приводящим к накоплению продуктов деградации молочного жира и ухудшению качества. В связи с этим актуальна разработка экспресс-методов неразрушающего контроля, позволяющих идентифицировать ранние стадии порчи сухого цельного молока. Цель исследования – оценить возможность применения рамановской спектроскопии для регистрации процессов порчи сухого цельного молока при хранении.

Объекты исследования – образцы сухого цельного молока, хранившиеся при температуре  $45 \pm 2^\circ\text{C}$  в течение 15 недель (с шагом 3 недели). Спектры комбинационного рассеяния регистрировали на портативном рамановском спектрометре EnSpectr R785 (ООО «Спектр-М», Россия). Изменение жирнокислотного состава фиксировали методом газовой хроматографии с применением газового хроматографа Кристаллюкс 4000М (ООО «НПФ «Мета-хром», Россия).

Установлено, что наиболее информативны спектральные диапазоны 325–370, 375–425, 800–900 и 2840–2970  $\text{cm}^{-1}$ , вместе с тем максимальная статистическая значимость обнаружена для диапазона 800–900  $\text{cm}^{-1}$  ( $F = 7,36$ ;  $p < 0,001$ ), отражающего структурные преобразования липидно-белковой составляющей молочной матрицы. Анализ главных компонент показал нелинейный характер спектральных изменений при хранении. Газохроматографическое исследование выявило стабильность жирнокислотного состава за исключением пальмитиновой и стеариновой кислот и изомеров олеиновой кислоты. При этом наибольшая корреляция изменения жирнокислотного состава при хранении характерна для низкочастотного диапазона 325–370  $\text{cm}^{-1}$ .

Наиболее тесные корреляции с результатами газовой хроматографии продемонстрировала область 325–370  $\text{cm}^{-1}$ . Область 800–900  $\text{cm}^{-1}$ , напротив, оказалась лидером по статистической значимости.

**Ключевые слова.** Сухое цельное молоко, качество, рамановская спектроскопия, жирнокислотный состав

**Финансирование.** Исследование выполнено в рамках выполнения государственного задания FNSS-2025-0001.

**Для цитирования:** Барковская И. А., Королёва П. И., Косарева А. В., Туровская С. Н., Рыбакова Е. Е. и др. Спектральные маркеры деградации липидного профиля сухого цельного молока при хранении. Техника и технология пищевых производств. 2026. Т. 56. № 3. С. 610–622. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-3-2661>

## Spectral Degradation Markers in Lipid Profile of Whole Milk Powder during Storage



Irina A. Barkovskaya\*, Polina I. Koroleva,  
Anastasia V. Kosareva, Svetlana N. Turovskaya,  
Elizaveta E. Rybakova, Vladislav Yu. Yaryshev,  
Elena A. Yurova, Vladislav K. Semipyatniy, Aram G. Galstyan

All-Russian Dairy Research Institute, Moscow, Russia

Received: 01.06.2026

Revised: 24.08.2026

Accepted: 01.09.2026

\*e-mail: [i\\_barkovskaya@vniimi.org](mailto:i_barkovskaya@vniimi.org)

© I.A. Barkovskaya, P.I. Koroleva, A.V. Kosareva, S.N. Turovskaya,  
E.E. Rybakova, V.Y. Yaryshev, E.A. Yurova, V.K. Semipyatniy,  
A.G. Galstyan, 2026



### Abstract.

Whole milk powder is one of the most sought-after dairy ingredients due to its high nutritional value, long shelf life, and wide range of functional and technological properties. However, milk powder is rich in lipids, which makes it sensitive to oxidative and hydrolytic spoilage, resulting in the accumulation of milk fat degradation products and quality deterioration. New rapid, non-destructive testing methods can identify the early stages of spoilage in whole milk powder. This research evaluated the use of Raman spectroscopy for the early detection of spoilage in whole milk powder during storage.

The study featured samples of whole milk powder stored at  $45 \pm 2^\circ\text{C}$  for 15 weeks, with analysis performed in 3-week increments. Raman spectra were recorded using a portable EnSpectr R785 Raman spectrometer (Russia). Changes in the fatty acid composition were analyzed using a Crystallux 4000M gas chromatograph (Russia).

The most informative spectral ranges included the regions at 325–370, 375–425, 800–900, and 2840–2970  $\text{cm}^{-1}$ . The highest statistical significance belonged to the range of 800–900  $\text{cm}^{-1}$  ( $F = 7.36$ ;  $p < 0.001$ ), which reflected the structural transformations of the lipid-protein component of the milk matrix. Principal component analysis (PCA) showed the non linear nature of spectral changes during storage. Gas chromatography analysis revealed a relatively stable fatty acid composition, with the exception of palmitic, stearic, and oleic acid isomers. The strongest correlation with changes in fatty acid composition during storage was observed in the low-frequency range of 325–370  $\text{cm}^{-1}$ .

In conclusion, the 325–370  $\text{cm}^{-1}$  region exhibited the closest correlations with the gas chromatography results, while the 800–900  $\text{cm}^{-1}$  region had the highest statistical significance.

**Keywords.** Whole milk powder, quality, Raman spectroscopy, fatty acid composition

**Funding.** The study was conducted under state assignment FNSS-2025-0001.

**For citation:** Barkovskaya IA, Koroleva PI, Kosareva AV, Turovskaya SN, Rybakova EE, *et al.* Spectral Degradation Markers in Lipid Profile of Whole Milk Powder during Storage. Food Processing: Techniques and Technology. 2026;56(3):610–622. (In Russ.) <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-3-2661>

### Введение

Повышение качества пищевой продукции является одной из приоритетных задач современного этапа развития реального сектора экономики РФ – пищевой промышленности. Эта задача ориентирована на обеспечение населения полноценным питанием для увеличения продолжительности жизни [1, 2]. Среди важных сырьевых компонентов, используемых в различных отраслях пищевой индустрии, – сухие молочные продукты: сухое молоко, сухие концентраты молочных или сывороточных белков, сухая сыворотка, сухой пермеат и др. Наибольшее распространение благодаря масштабы производства и отработанной техно-

логии получило сухое молоко (цельное или обезжиренное) [3–5]. Высокая пищевая ценность и широкий спектр функционально-технологических свойств обуславливают его применение в производстве молочной, мясной, кондитерской и другой продукции [6–9]. Кроме того, длительные сроки годности при соблюдении надлежащих условий хранения и логистические преимущества перед жидкими и концентрированными молочными продуктами определяют особую роль сухого цельного молока (СЦМ) и сухого обезжиренного молока (СОМ) в условиях полярных и приполярных территорий: там они остаются единственным сырьем для производства молочной продукции. В этих регионах

доступ к скоропортящемуся молочному сырью ограничен из-за невозможности полноценного ведения молочного скотоводства [6, 10, 11]. Сухое молоко также входит в номенклатуру пищевой продукции, используемой в качестве гуманитарной помощи по линии МЧС, служит элементом формирования стратегического пищевого запаса и удобно для питания участников длительных экспедиций [12, 13]. Широкая востребованность сухого молока определяет две важные отраслевые задачи: обеспечение стабильности качества и расширение метрик для его контроля.

СЦМ в отличие от СОМ содержит значительную липидную фракцию (более 26 %), что служит одним из основных лимитирующих факторов его сохранности, поскольку данная фракция, состоящая из молочного жира и жироподобных веществ (фосфолипидов, стерин и др.), подвержена гидролитическим (липолизным) и окислительным процессам химического, биохимического или микробиологического происхождения, которые в разной степени инициируются остаточной активностью ферментов, режимами производства, видами упаковочных материалов и условиями окружающей среды в процессе хранения [6, 7, 14–16]. Липолиз приводит к образованию свободных жирных кислот и глицеридов, тогда как окисление способствует накоплению первичных (гидроксипероксидов) и вторичных (малонового диальдегида, оксипинолов и др.) продуктов окисления [7, 14, 16, 17]. Эти процессы (даже при медленной скорости их протекания) неизбежно вызывают негативные последствия для СЦМ: снижение пищевой ценности [17], ухудшение органолептических свойств (появление нехарактерных привкусов и запахов) [18, 19] и функционально-технологических (растворимость, смачиваемость и др.) характеристик [8, 20]. Кроме того, вторичные продукты окисления молочного жира могут инициировать риски для здоровья потребителей, особенно для уязвимых групп населения (дети, люди пожилого возраста и пациенты с различными заболеваниями) [21, 22].

Вследствие этого возникает проблема раннего и оперативного выявления пороков, связанных с негативными процессами, поскольку накопление продуктов порчи имеет индукционный период и сначала проходит практически на молекулярном уровне, не достигая порога, при котором возможно применение органолептического анализа с привлечением специально обученных дегустаторов или использование распространенных титриметрических методов определения кислотных и перекисных чисел. Традиционные методы анализа (ВЭЖХ, ГХ-МС), стандартизованные во многих методиках, обладают достаточно высокой точностью, но требуют сложной пробоподготовки, наличия реактивов, присутствия специалистов высокой квалификации, а также являются длительными и трудоемкими.

В этой связи необходимо проведение комплекса научно-исследовательских мероприятий по разработке и внедрению экспресс-методов неразрушаю-

щего контроля (без пробоподготовки), способных выявлять и диагностировать деградацию СЦМ уже на стадии индукционного периода порчи и тем самым прогнозировать сроки годности, а также определять возможности рационального использования СЦМ в качестве рецептурного компонента в производстве различных видов пищевой продукции.

В последнее десятилетие в аналитических исследованиях пищевой отрасли наблюдается активное применение спектроскопических подходов, направленных на совершенствование существующих и создание новых объективных методов оценки качества, количества и безопасности продукции. Особое место среди них занимает рамановская спектроскопия (РС), основанная на принципе получения «отпечатка пальцев», т. е. структурной информации о молекулах («молекулярного отпечатка»), причем измерения выполняются неинвазивным путем (без разрушающего воздействия на исследуемый образец) [23, 24]. Кроме того, РС обладает еще рядом других преимуществ: возможностью автоматизации и встраивания в технологический процесс, выполнением многопараметрических анализов (даже через прозрачную неабсорбирующую упаковку, в режиме реального времени, независимо от наличия влаги в образце), точностью и быстротой. Комбинирование РС с математической и статистической обработкой (хемометрические методы) и машинным обучением позволяет перейти от простой идентификации составных частей продукции к предиктивному анализу и их диагностике [25, 26]. В основе метода РС лежит неупругое рассеяние монохроматического света (потока фотонов), при котором их энергия изменяется на величину, соответствующую колебательным переходам молекул образца. Получаемый спектр состоит из набора характерных пиков, присущих валентным и деформационным колебаниям конкретных химических связей. В молочной индустрии РС используется для анализа состава (жиров, белков, углеводов) и выявления фальсификации, определения реологических свойств и функционально-технологических характеристик и др., т. е. метод становится все более популярным в качестве надежного инструментария для контроля качества и безопасности продукции. При выявлении деградационных процессов РС чувствительна к изменению жирнокислотного состава, конформационным изменениям структуры белков, накоплению продуктов гликирования и окисления [23, 27].

Несмотря на активное развитие и эффективное применение спектроскопических подходов для анализа молочной продукции, в научно-технической литературе представлено ограниченное количество систематических исследований, посвященных изменению составных частей СЦМ, а именно взаимосвязи спектральных характеристик и процессов порчи (окислительных и гидролитических) в процессе хранения, а также идентификации маркеров ранних стадий деградации сухой молочной матрицы. В опубликованных работах

в основном анализируют восстановленное молоко из сухих систем либо из СОМ, в которых липидная фракция присутствует в незначительном количестве (менее 1,5 %). Также отсутствует структурированный перечень спектральных маркеров, позволяющих однозначно выявлять и дифференцировать раннюю и активную стадии возникновения пороков. Таким образом, целенаправленное исследование, устанавливающее взаимосвязь между накоплением продуктов деградации и откликами колебательных спектров, является своевременным и актуальным. Цель исследования – оценить возможность применения РС для идентификации процессов порчи сухого цельного молока при хранении.

### Объекты и методы исследования

Объектами исследования служили образцы сухого цельного молока (СЦМ). Для интенсификации процессов деградации липидного профиля продукта и получения выраженной динамики изменений на протяжении экспериментального периода использовали режим ускоренного хранения при повышенной температуре ( $45 \pm 2$  °С), что является общепринятым подходом при исследовании механизмов окислительной порчи пищевых продуктов, в т. ч. СЦМ [28]. Свежевыработанное в производственных условиях СЦМ расфасовано в бумажную многослойную упаковку с полиэтиленовыми вкладышами массой  $1000 \pm 50$  г. Образцы СЦМ закладывали на хранение в климатической камере СМ-70/150-250ТВХ (ООО «СМ-Климат», Россия) при температуре  $45 \pm 2$  °С на срок до 15 недель. Отбор проб проводили каждые 3 недели (через 3, 6, 9, 12 и 15 недель). В качестве контроля выступал образец СЦМ, отобранный до начала эксперимента (нулевая временная точка).

Спектры комбинационного рассеяния регистрировали на рамановском спектрометре EnSpectr R785 (ООО «Спектр-М», Россия), оснащенный микроскопной приставкой, в диапазоне  $200\text{--}3500$  см<sup>-1</sup> при длине волны лазера 785 нм и мощности 22 мВт. Из каждой пробы отбирали две навески массой примерно 2–3 г и помещали на предметное стекло без дополнительной пробоподготовки. Регистрировали спектры с трех различных участков навески для каждой из двух навесок. Таким образом, для каждого образца получали 6 спектров. Условия съемки: объектив с увеличением  $\times 10$ , время экспозиции 1–2 с, 70 накоплений. Калибровку по волновым числам проводили с использованием эталонного образца полистерола (погрешность  $\pm 1$  см<sup>-1</sup>). Измерения выполняли при комнатной температуре. Фон предметного стекла вычитали на этапе предварительной обработки. Дальнейшая обработка спектров включала коррекцию базовой линии методом «rolling ball» (окно 100), сглаживание по Савицкому-Голаю (окно 21, полином 3), интерполяцию на сетку с шагом 1 см<sup>-1</sup> и нормализацию по площади.

Статистический анализ проводили на 36 индивидуальных спектрах (6 образцов  $\times$  6 повторностей)

с использованием однофакторного анализа ANOVA и post-hoc теста Тьюки ( $p < 0,05$ ). Для анализа главных компонент (PCA) использовали центрирование по всей области спектра. Обработка спектров и статистический анализ выполнены в Python с использованием SciPy и NumPy и Pandas. Жирнокислотный состав определяли по ГОСТ 32915-2014 на хроматографе Кристаллюкс 4000М (ООО «НПФ «Мета-хром», Россия), погрешность метода –  $\pm 0,40$  %.

Далее оценивали корреляцию между спектральными данными и составом жирных кислот. Для каждого информативного спектрального интервала рассчитывали интегральную интенсивность (по сглаженным спектрам) и коэффициент корреляции Пирсона с содержанием отдельных жирных кислот, а также их сумм – насыщенных, моновенасыщенных и полиненасыщенных. В исследовании представлены только корреляции с  $R^2 \geq 0,6$  в качестве допустимого уровня корреляции в большинстве исследований. Уровень значимости  $p$  рассчитывали для каждой связи; статистически значимыми считали корреляции при  $p < 0,05$ . Связи с  $p$  в диапазоне 0,05–0,07 рассматривали как пограничные и включали в таблицу для полноты представления данных.

Часть исследований выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования Всероссийского научно-исследовательского института молочной промышленности (ЦКП ВНИМИ, Москва, Россия).

### Результаты и их обсуждение

В ходе работы обработаны рамановские спектры образцов сухого цельного молока (СЦМ) с различными сроками хранения при  $45 \pm 2$  °С (3, 6, 9, 12 и 15 недель). На основе нормализованных спектров построены разностные спектры (рис. 1) ( $\Delta I = I(\text{образец}) - I(\text{контроль})$ ), которые позволили визуализировать и количественно оценить спектральные изменения, происходящие в продукте при хранении. В результате анализа разностных спектров выявлено несколько спектральных областей с выраженными изменениями: 325–370 и 375–425; 800–900, 1420–1480 и 2840–2970 см<sup>-1</sup>. В области ниже 700 см<sup>-1</sup> (в частности, 325–370 и 375–425 см<sup>-1</sup>) наблюдали изменения, связанные с лактозой. Согласно литературным данным, пики ниже 700 см<sup>-1</sup> относятся к скелетному сигналу, эндоциклическим и экзоциклическим деформационным колебаниям химических связей лактозы [29]. Изменения в данной области отражают физико-химические процессы, происходящие с углеводной фракцией при хранении, в т. ч. переход лактозы из аморфного состояния в кристаллическое. В области 800–900 см<sup>-1</sup> модификации связаны преимущественно с фосфолипидами и структурными перестройками белков. В данном диапазоне регистрируются колебания головных групп фосфолипидов, чувствительных к гидратации и изменениям упаковки липидных цепей [30]. Также вариации в об-



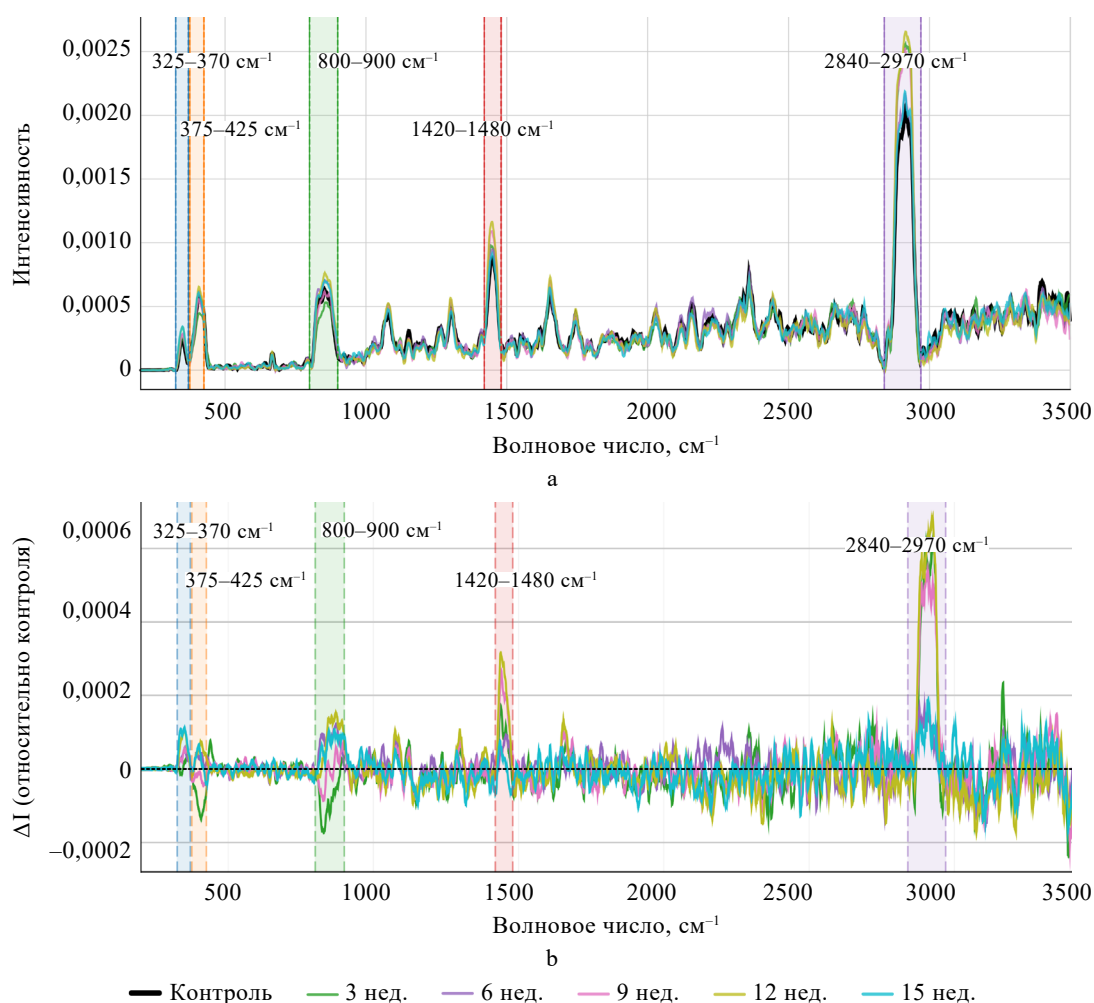


Рисунок 1. Спектры комбинационного рассеяния сухого цельного молока в процессе хранения: а – исходные; б – разностные ( $\Delta I$ ). Цветом выделены анализируемые спектральные участки

Figure 1. Raman scattering spectra of whole milk powder during storage: a – initial; b – difference ( $\Delta I$ ). The spectral regions are color-coded

ласти  $800\text{--}900\text{ см}^{-1}$  могут свидетельствовать о структурных перестройках белковой фракции и изменениях в фосфолипидном слое, что может быть связано с дефосфорилированием казеина и изменением его мицеллярной структуры [31]. Область  $1420\text{--}1480\text{ см}^{-1}$  соответствует деформационным колебаниям метиленовых ( $\text{CH}_2$ ) и метильных ( $\text{CH}_3$ ) групп жирных кислот и является маркером общего содержания липидов и длины их цепей [32, 33]. Область  $2840\text{--}2970\text{ см}^{-1}$ , соответствующая валентным колебаниям связей C-H в жирных кислотах, выступает наиболее информативным маркером состояния липидной фазы. Пики при  $2850\text{ см}^{-1}$  (симметричное  $\text{CH}_2$ ),  $2880\text{ см}^{-1}$  (асимметричное  $\text{CH}_2$ ),  $2930\text{ см}^{-1}$  (симметричное  $\text{CH}_3$ ) и  $2967\text{ см}^{-1}$  (асимметричное  $\text{CH}_3$ ) отражают степень упаковки и кристаллическости липидных цепей [33]. Изменения в этой области указывают на окислительную порчу молочного жира, которая приводит к нарушению структуры триглицеридов и изменению соотношения насыщенных и ненасыщенных жирных кислот.

Для количественной оценки спектральных изменений при хранении СЦМ использовали интегральную площадь под спектральной кривой, устойчивую к шуму, и максимальную интенсивность пика (более чувствительную к локальным структурным перестройкам). Критерий Фишера ( $F$ ) применяли для оценки отношения межгруппового разброса к внутригрупповому. Оба подхода дали сходные тенденции, поэтому для отображения выбраны только интенсивности пиков (рис. 2). В области  $325\text{--}370\text{ см}^{-1}$  оба параметра одновременно возрастали от контроля к 15-й неделе (интеграл  $+60\%$ ; пик  $+40\%$ ), а в соседней области  $375\text{--}425\text{ см}^{-1}$  зафиксировано одинаковое падение на 3-й неделе ( $-22\%$  для обоих) с последующим восстановлением к исходному уровню. Данные спектральные диапазоны, вероятно, отражают изменения лактозы, а именно ее кристаллизацию при длительном хранении. При этом наиболее информативной оказалась область  $800\text{--}900\text{ см}^{-1}$  с максимальной статистической значимостью (интеграл  $-F = 7,36$ ;  $p < 0,001$ ;

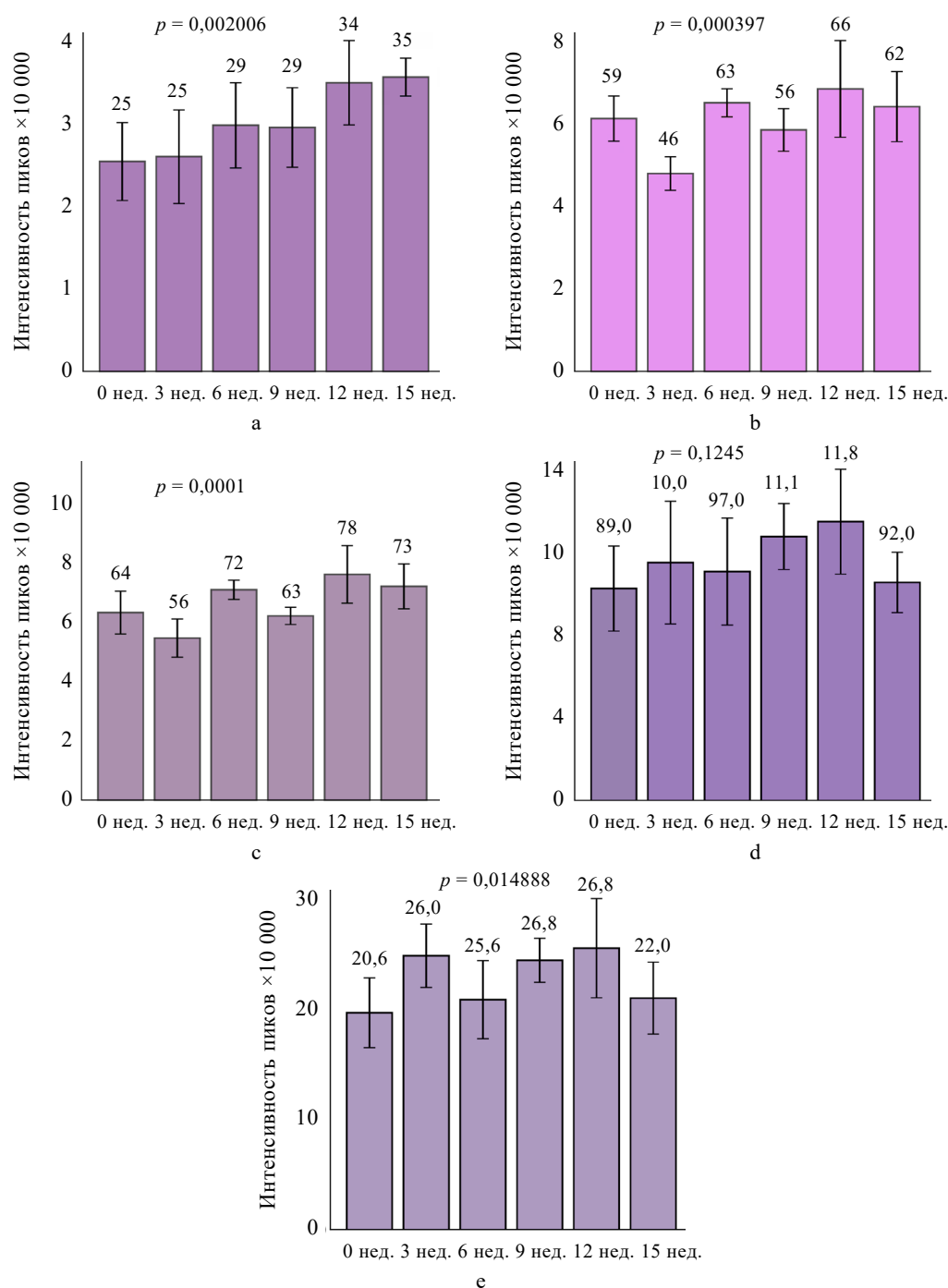


Рисунок 2. Интенсивности пиков ( $\times 10\,000$ ) в анализируемых областях спектра сухого цельного молока при различных сроках хранения: а – 325–370  $\text{cm}^{-1}$ ; б – 375–425  $\text{cm}^{-1}$ ; в – 800–900  $\text{cm}^{-1}$ ; д – 1420–1480  $\text{cm}^{-1}$ ; е – 2840–2970  $\text{cm}^{-1}$  ( $p$ -value, ANOVA)

Figure 2. Peak intensities ( $\times 10,000$ ) in the analyzed spectral regions of whole milk powder at different storage periods: а – 325–370  $\text{cm}^{-1}$ ; б – 375–425  $\text{cm}^{-1}$ ; в – 800–900  $\text{cm}^{-1}$ ; д – 1420–1480  $\text{cm}^{-1}$ ; and е – 2840–2970  $\text{cm}^{-1}$  ( $p$ -value, ANOVA)

пик –  $F = 8,53$ ;  $p < 0,001$ ) и наибольшим числом значимых попарных различий (5 пар). Примечательно, что в этом диапазоне наблюдалось падение интенсивности на 3-й неделе хранения с последующим ростом к 12-й неделе, что может отражать структурные перестройки липид-белковых мембран. Область 2840–

2970  $\text{cm}^{-1}$  (C–H валентные колебания жирных кислот) дала слабую, но статистически значимую динамику ( $F = 3,40$ ;  $p = 0,015$ ) при высоком внутригрупповом разбросе и единственной значимой паре (контроль – 12 недель), поэтому ее можно рассматривать лишь как вспомогательный маркер липидных изменений.

Область 1420–1480  $\text{cm}^{-1}$  ( $\text{CH}_2$ -деформационные колебания) не выявила статистически значимых изменений ( $F = 1,90$ ;  $p = 0,125$ ) и характеризовалась высоким разбросом значений и исключена из дальнейшего анализа. На основе значимых спектральных маркеров проверена возможность выявления общего паттерна изменений для каждого срока хранения с помощью PCA (метод главных компонент) (рис. 3).

Контрольный образец располагается обособленно в правой части графика, что отражает исходное стабильное состояние. Кластер 3-й недели значительно удален от остальных групп, что говорит о его исключительном положении и наиболее выраженных отклонениях на начальном этапе хранения. Кластеры 12 и 15 недель, напротив, близки друг к другу: они находятся в верхней части графика и частично перекрываются, что указывает на сходство спектральных характеристик на этих сроках и формирование общего тренда структурных перестроек. Вероятно, деградация СЦМ замедляется на поздних сроках хранения, поэтому различия менее выражены. Шестинедельные образцы расположены центрально-сверху, пересекаясь с кластерами контроля и поздних сроков. Этот срок можно рассматривать как переходную точку. Кластер 9-й недели перекрывается с 3-й группой в нижней левой области, что может свидетельствовать о частичной обратимости процессов. Наиболее выраженные изменения приходятся на 12-ю неделю: кластер занимает самое верхнее положение по PC2, имеет максимальную площадь и наибольший разброс по PC1 – это указывает на пик гетерогенности и наиболее глубокие структур-

ные перестройки. Таким образом, 3-я неделя выступает критическим триггерным этапом, запускающим каскад изменений, тогда как к 12–15 неделям система переходит в новое стационарное состояние.

PCA выявил общую нелинейную тенденцию: после контроля наблюдаются сильные изменения к 3-й неделе, а пик изменений приходится на 12-ю с последующим замедлением процессов. Четкой линейной закономерности при этом не наблюдается из-за сложности и многостадийности процессов в гетерогенной матрице продукта. Одним из препятствий является то, что липидные области (2840–2970 и 1420–1480  $\text{cm}^{-1}$ ) характеризуются высокой вариабельностью и перекрыванием полос, что ограничивает информативность рамановской спектроскопии для детального анализа жирнокислотного состава. Поэтому для подтверждения выводов и количественной оценки изменений жирнокислотного профиля дополнительно использовали газовую хроматографию (рис. 4).

Газовая хроматография жирнокислотного состава не показала изменений для большинства жирных кислот. Однако для некоторых компонентов липидной фракции зафиксированы статистически значимые колебания. Среди насыщенных кислот заметнее всего менялась пальмитиновая ( $\text{C16:0}$ ) – через 3 недели ее содержание снизилось на 1,0 %, но к концу срока вернулось к исходному уровню. Сходная картина наблюдалась у стеариновой кислоты ( $\text{C18:0}$ ): падение с 9,74 до 8,77 % к 21-м суткам с последующим возвратом. Из ненасыщенных кислот наиболее существенные сдвиги отмечены для транс-изомера олеиновой

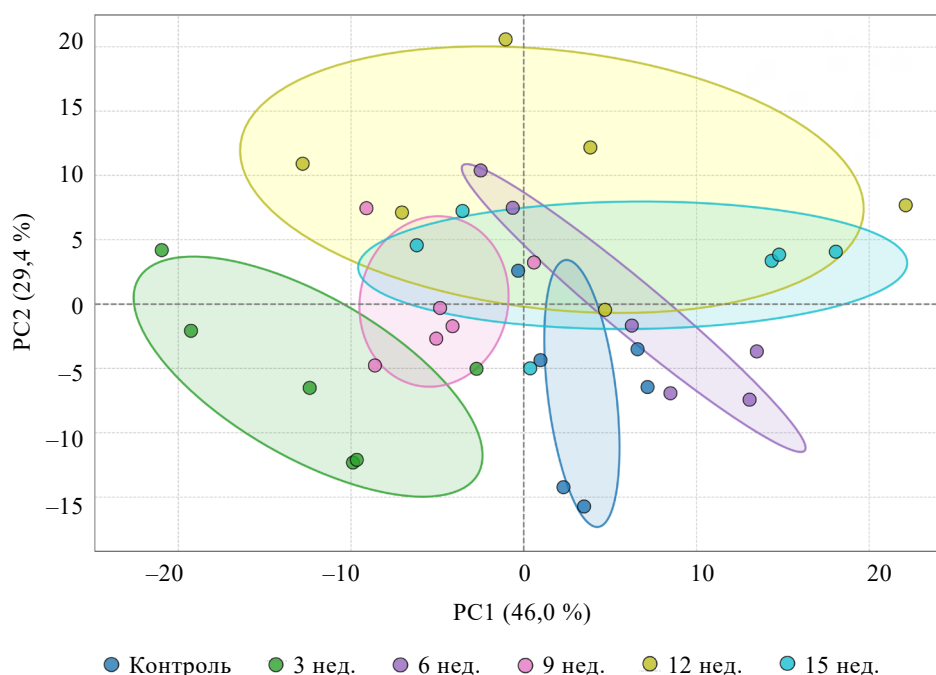


Рисунок 3. PCA-проекция спектральных данных сухого цельного молока для значимых областей

Figure 3. PCA projection for significant spectral regions in whole milk powder

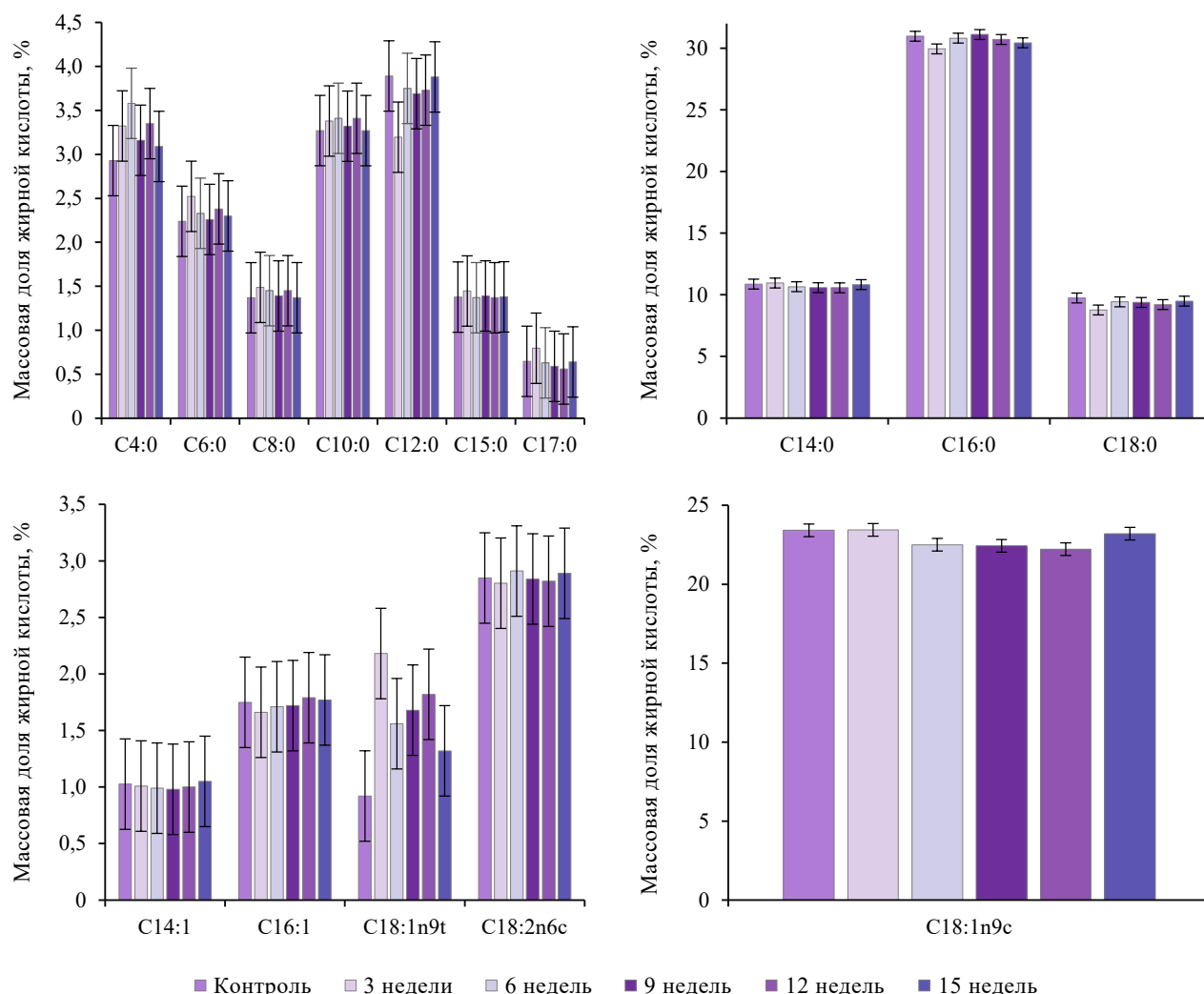


Рисунок 4. Изменение жирнокислотного состава сухого цельного молока в процессе хранения при  $45 \pm 2^\circ\text{C}$

Figure 4. Fatty acid composition of whole milk powder during storage at  $45 \pm 2^\circ\text{C}$

кислоты (C18:1n9t): его доля за 21 день хранения выросла на 1,26 % (с 0,92 до 2,18 %), что может свидетельствовать о высокой склонности к окислительной порче. В дальнейшем концентрация снижалась до 1,56 % к 6-й неделе, после чего вновь постепенно возрастала, достигая 1,82 % к 12-й неделе хранения, а на заключительном этапе эксперимента содержание жирной кислоты уменьшилось до 1,32 %, но оставалось выше исходного уровня. Для цис-изомера олеиновой кислоты (C18:1n9c) отмечалось значимое снижение в середине периода хранения с последующим восстановлением до исходного уровня. Нелинейная динамика может отражать последовательное протекание процессов изомеризации ненасыщенных жирных кислот, а также липолиза вследствие сохранения остаточной липолитической активности ферментов молока и последующего вовлечения образующихся соединений в трансформацию липидной фазы при хранении СЦМ [34–36]. Так, В. I. Davis *et al.* [35]

изучили изменение молочного жира при хранении сухого козьего цельного молока при 4 и 22 °C в течение 2 и 4 месяцев, в результате чего установлено увеличение скорости окисления как в условиях холодильного хранения, так и при комнатной температуре. Значения перекисного числа изменились с  $0,099 \pm 0,000$  до  $0,115 \pm 0,040$  и  $0,148 \pm 0,050$  через 2 и 4 месяца в условиях 4 °C, а при 22 °C – с  $0,107 \pm 0,020$  до  $0,166 \pm 0,050$  и  $0,182 \pm 0,080$  (увеличение примерно на 70 %) через 2 и 4 месяца соответственно. Массовая доля масляной (C4:0), капроновой (C6:0), каприловой (C8:0) и олеиновой (C18:1) кислот постепенно снижалась, а концентрация миристиновой кислоты (C14:0) увеличилась в процессе хранения как в условиях холодильного хранения, так и при комнатной температуре. Авторы связывают модификации жирнокислотного состава сухого молока при хранении с процессами липолиза и последующим окислением высвободившихся свободных жирных кислот, поскольку



после процесса дегидратации молока сохраняется остаточная липолитическая активность. Результаты С. R. D. Fonseca *et al.* [34] также подтверждают термостабильные свойства липаз молока, установленные при изучении влияния условий хранения сырого козьего молока (1, 3 и 5 дней в холодильнике) с параллельным накоплением титра липолитических бактерий на качество полученного из него сухого цельного молока при хранении в условиях 25 °С в течение 60, 120 и 180 дней. Показано, что термостабильные липазы, сохраняющиеся в готовом продукте, способны инициировать гидролиз триглицеридов с накоплением свободных жирных кислот: концентрация каприловой кислоты (C8:0) возросла на 52,4 % (с  $2,1 \pm 0,4$  до  $3,2 \pm 0,3$  мг/100 г); каприновой (C10:0) – на 30,8 % (с  $1,3 \pm 0,1$  до  $1,7 \pm 0,1$  мг/100 г); лауриновой (C12:0) – на 49,1 % (с  $5,5 \pm 0,2$  до  $8,2 \pm 0,3$  мг/100 г); миристиновой (C14:0) – на 35,5 % (с  $3,1 \pm 0,3$  до  $4,2 \pm 0,6$  мг/100 г). Данные [21] также согласуются с тем, что трансформации липидной фракции при хранении сухого молока (25 °С) протекают многостадийно и часто нелинейно. В продукте одновременно накапливаются первичные продукты окисления и промежуточные соединения реакции Майяра, образуются летучие соединения и свободные радикалы, а также изменяются цветометрические характеристики: отсутствие единой направленности изменения показателей порчи при выдержке. Перекисное число у части образцов сначала возрастало, затем снижалось, что объясняют переходом от накопленных гидроперекисей к низкомолекулярным вторичным продуктам окисления (альдегидам, кетонам, кислотам). Аналогичная тенденция наблюдается и для показателя вторичного окисления (реакция с тиобарбитуровой кислотой). Кроме того, процесс порчи сухого молока сопровождался накоплением летучих продуктов окисления молочного жира, в особенности гексаналя (основной маркер окисления ненасыщенных жирных кислот): через год хранения концентрация показателя составила  $6281,4 \pm 308,9$  мкг/кг в некоторых образцах. Таким образом, приведенные литературные данные свидетельствуют о том, что изменение жирнокислотного состава СЦМ при хранении обусловлено не отдельным процессом, а совокупностью взаимосвязанных реакций остаточного липолиза, изомеризации и последующего окислительного превращения жирных кислот. Нелинейный характер изменения содержания отдельных компонентов липидной фракции, наблюдаемый как в настоящей работе, так и в исследованиях других авторов, отражает последовательную смену стадий деградации молочного жира и подтверждает сложный механизм его трансформации при хранении.

Несмотря на выявленные изменения отдельных компонентов жирнокислотного состава, сами по себе они не позволяют установить, какие именно молекулярные преобразования обуславливают наблюдаемые изменения спектров комбинационного рассеяния.

В связи с этим на следующем этапе работы проведен корреляционный анализ между интегральной интенсивностью наиболее информативных спектральных диапазонов и содержанием отдельных жирных кислот, а также групп жирных кислот, позволяющий оценить взаимосвязь спектральных маркеров с трансформацией липидного профиля сухого цельного молока (табл. 1).

Для диапазона волновых чисел 325–370 см<sup>-1</sup> выявлены преимущественно отрицательные корреляции с концентрациями насыщенных жирных кислот, содержащими нечетное число атомов углерода, а также с суммой концентраций мононенасыщенных жирных кислот, наиболее высокая степень взаимосвязи установлена для цис-11,14,17-эйкозотетраеновой кислоты (C20:3n3) ( $R^2 = 0,849$ ). С биохимической точки зрения природа выявленных взаимосвязей остается не вполне очевидной, поскольку большая часть работ, посвященных изучению рамановских спектров молочной системы, указывает, что данный диапазон характеризует трансформации лактозы [29]. Следовательно, полученные закономерности требуют дальнейшего изучения и экспериментального подтверждения. Для диапазона 800–900 см<sup>-1</sup> наиболее выраженные корреляции получены с концентрациями миристиновой и цис-олеиновой кислот, что соответствует литературным данным, согласно которым данный диапазон спектра чувствителен к структурным изменениям липидной фазы и компонентов оболочки жировых шариков [30]. Несмотря на отсутствие статистически значимых изменений в интенсивности области 1420–1480 см<sup>-1</sup>, при сравнении сроков хранения СЦМ выявлены сильные корреляционные связи для содержания отдельных ненасыщенных жирных кислот, особенно линоленовой:  $R^2 = 0,910$ . В области 2840–2970 см<sup>-1</sup>, которая характеризует валентные симметричные и асимметричные колебания связей С–Н алифатических цепей жиров [23, 24, 32], проведенный корреляционный анализ выявил преимущественно связи с ненасыщенными длинноцепочечными жирными кислотами. Наиболее высокая положительная корреляция установлена для концентраций линоленовой ( $R^2 = 0,815$ ) и цис-13,16-докозодиеновой ( $R^2 = 0,732$ ) кислот, а для олеиновой и цис-11,14-эйкозодиеновой установлены менее выраженные ( $R^2 = 0,626$  и  $0,635$  соответственно) отрицательные корреляции. Выявленные взаимосвязи, вероятно, обусловлены изменением конформации алифатических цепей липидов, происходящим в результате термоокислительной модификации при ускоренном хранении сухого цельного молока.

Проведенный корреляционный анализ показал, что различные информативные области рамановского спектра характеризуются неодинаковой чувствительностью к изменениям жирнокислотного состава СЦМ при хранении. Самые сильные корреляции зафиксированы для области 325–370 см<sup>-1</sup>, которую в литературе связывают с колебаниями гликозидных связей

Таблица 1. Результаты корреляционного анализа интегральной интенсивности спектральных диапазонов с содержанием жирных кислот в сухом цельном молоке

Table 1. Integral intensity of spectral bands vs. fatty acid content in whole milk powder: Correlation analysis

| Спектральный диапазон, см <sup>-1</sup> | Жирная кислота / группа жирных кислот    | R <sup>2</sup> | p      | Направление связи |
|-----------------------------------------|------------------------------------------|----------------|--------|-------------------|
| 325–370                                 | Тридекановая (C13:0)                     | 0,691          | 0,0402 | отрицательное     |
|                                         | Пентадекановая (C15:0)                   | 0,815          | 0,0138 | отрицательное     |
|                                         | Маргариновая (C17:0)                     | 0,693          | 0,0399 | отрицательное     |
|                                         | Генейкозановая (C21:0)                   | 0,678          | 0,0442 | отрицательное     |
|                                         | Трикозановая (C23:0)                     | 0,700          | 0,0378 | отрицательное     |
|                                         | Гамма-линолевая (C18:3n6)                | 0,626          | 0,0609 | отрицательное     |
|                                         | Цис-11,14,17-эйкозотетраэновая (C20:3n3) | 0,849          | 0,0090 | отрицательное     |
|                                         | Сумма мононенасыщенных жирных кислот     | 0,687          | 0,0416 | отрицательное     |
|                                         | Сумма полиненасыщенных жирных кислот     | 0,623          | 0,0620 | положительное     |
| 800–900                                 | Миристиновая (C14:0)                     | 0,728          | 0,0307 | отрицательное     |
|                                         | Трикозановая (C23:0)                     | 0,649          | 0,0531 | отрицательное     |
|                                         | Олеиновая (C18:1n9c)                     | 0,799          | 0,0162 | отрицательное     |
|                                         | Гамма-линолевая (C18:3n6)                | 0,651          | 0,0524 | положительное     |
| 1420–1480                               | Миристиновая (C14:0)                     | 0,682          | 0,0428 | отрицательное     |
|                                         | Нервоновая (C24:1)                       | 0,811          | 0,0143 | положительное     |
|                                         | Цис-13,16-докозодиеновая (C22:2)         | 0,825          | 0,0123 | положительное     |
|                                         | Олеиновая (C18:1n9c)                     | 0,768          | 0,0220 | отрицательное     |
|                                         | Линоленовая (C18:3n3)                    | 0,910          | 0,0031 | положительное     |
| 2840–2970                               | Нервоновая (C24:1)                       | 0,657          | 0,0503 | положительное     |
|                                         | Цис-11,14-эйкозодиеновая (C20:2)         | 0,635          | 0,0579 | отрицательное     |
|                                         | Цис-13,16-докозодиеновая (C22:2)         | 0,732          | 0,0297 | положительное     |
|                                         | Олеиновая (C18:1n9c)                     | 0,626          | 0,0610 | отрицательное     |
|                                         | Линоленовая (C18:3n3)                    | 0,815          | 0,0138 | положительное     |

лактозы и ее структурными сдвигами. Вероятно, здесь отражаются комплексные перестройки матрицы, затрагивающие как углеводную, так и липидную части, поскольку низкочастотная область чувствительна к изменениям межмолекулярных связей. Таким образом, спектральная характеристика определяется не столько изменением концентрации отдельных кислот, сколько перестройкой самих липидных структур. Это открывает перспективу применения рамановской спектроскопии вместе с хемометрикой в качестве инструмента выявления признаков деградации СЦМ.

### Выводы

Рамановская спектроскопия позволяет регистрировать молекулярные изменения в сухом цельном молоке при ускоренном хранении. Среди исследованных диапазонов 325–370 и 800–900 см<sup>-1</sup> выделяются как наиболее информативные. Первый, который принято связывать с колебаниями химических связей лактозы, неожиданно продемонстрировал наиболее сильные корреляции с изменениями жирнокислотного состава. Второй, связанный с фосфолипидным слоем и скелетными колебаниями С–С, показал максимальную статистическую значимость при сравнении сроков хранения и, вероятно, отражает перестройку липид-белковых мембран. При этом оба диапазона отражают не столько колебания отдельных групп,

сколько упаковку отдельных компонентов матрицы. Вместе с тем газохроматографический анализ продемонстрировал общую стабильность жирнокислотного профиля. Наиболее выраженные сдвиги затрагивают пальмитиновую, стеариновую и олеиновую кислоты (как цис-, так и транс-изомеры), причем динамика этих изменений нелинейная. Это согласуется с тенденцией спектральных изменений, выявленной методом главных компонент, и указывает на многостадийный характер процессов окисления и липолиза.

### Критерии авторства

Авторы в равной степени участвовали в написании рукописи.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### Contribution

The authors contributed equally to the research and bear equal responsibility for the 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. Алкадур М. И., Петров А. Н., Пряничникова Н. С. Влияние класса термической обработки сухого молока на структуру и свойства ферментированного сгустка. *Пищевая промышленность*. 2024. № 11. С. 82–89. [Alkadour MI, Petrov AN, Pryanichnikova NS. Influence of the class of thermal treatment of dry milk on the structure and properties of the fermented curd. *Food Industry*. 2024;(11):82–89. (In Russ.)] <https://doi.org/10.52653/PPI.2024.11.11.015>
2. Пряничникова Н. С. К частным вопросам реализации стратегии 2030 в молочной промышленности. *Молочная промышленность*. 2022. № 9. С. 10–13. [Pryanichnikova NS. On specific issues of implementing the Strategy 2030 in the dairy industry. *Dairy industry*. 2022;(9):10–13. (In Russ.)] <https://doi.org/10.31515/1019-8946-2022-09-10-12>
3. Пряничникова Н. С., Хуршудян С. А. Управление качеством и безопасностью сухого молока. *Пищевая промышленность*. 2025. № 3. С. 78–83. [Pryanichnikova NS, Khurshudyun SA. Quality and safety management of milk powder. *Food industry*. 2025;(3):78–83. (In Russ.)] <https://doi.org/10.52653/PPI.2025.3.3.015>
4. Бедретдинова С. А., Пряничникова Н. С., Исаева Е. Д., Абдуллаева Л. В., Савенкова Т. В. Интегративный подход к формированию оценочных критериев качества продуктов мембранного фракционирования молока. *Пищевая промышленность*. 2025. № 12. С. 128–132. [Bedretdinova SA, Pryanichnikova NS, Isaeva ED, Abdullaeva LV, Savenkova TV. Integrative approach to the formation of evaluation criteria for the quality of milk membrane fractionation products. *Food Industry*. 2025;(12):128–132. (In Russ.)] <https://doi.org/10.52653/PPI.2025.12.12.023>
5. Пряничникова Н. С., Туровская С. Н. Новые стандарты на сухие молочные ингредиенты. Контроль качества продукции. 2025. № 5. С. 20–26. [Pryanichnikova NS, Turovskaya SN. New standards for dry dairy ingredients. *Product Quality Control*. 2025;(5):20–26. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/FOICUG>
6. Phosanam A, Chandrapala J, Huppertz T, Adhikari B, Zisu B. Effect of storage conditions on physicochemical and microstructural properties of skim and whole milk powders. *Powder Technology*. 2020;372:394–403. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.06.020>
7. Барковская И. А., Туровская С. Н., Блиадзе В. Г., Илларионова Е. Е., Большакова Е. И. Основные механизмы, маркеры порчи и методы их обнаружения применительно к сухим молочным консервам. *Молочная промышленность*. 2025. № 3. С. 15–21. [Barkovskaya IA, Turovskaya SN, Bliadze VG, Illarionova EE, Bolshakova EI. Main spoilage mechanisms, spoilage markers and methods for their detection in dry canned dairy products. *Dairy Industry*. 2025;(3):15–21. (In Russ.)] <https://doi.org/10.21603/1019-8946-2025-3-42>
8. Кручинин А. Г., Илларионова Е. Е., Бигаева А. В. Роль технологических свойств сухого молока в формировании качества пищевых систем. *Вестник КрасГАУ*. 2020. № 8. С. 166–173. [Kruchinin AG, Illarionova EE, Bigaeva AV. Role of technological properties of milk powder in food system quality formation. *Bulletin of KrasGAU*. 2020;(8):166–173. (In Russ.)] <https://doi.org/10.36718/1819-4036-2020-8-166-173>
9. Алкадур М. И., Илларионова Е. Е. Влияние класса термообработки сухого молока на переход белка в сыворотку. *Пищевая промышленность*. 2025. № 3. С. 96–99. [Alkadur MI, Illarionova EE. Effect of heat treatment class of dry milk on protein transfer to whey. *Food Industry*. 2025;(3):96–99. (In Russ.)] <https://doi.org/10.52653/PPI.2025.3.3.018>
10. Ryabova AE, Semipyatnyi VK, Galstyan AG. Effects of storage conditions on milk powder properties. *Journal of Dairy Science*. 2023;106(10):6741–6758. <https://doi.org/10.3168/jds.2022-23094>
11. Рябова А. Е., Кондратенко В. В. Моделирование процесса самопрессования сухого молока в процессе хранения. *Пищевая промышленность*. 2024. № 9. С. 65–69. [Ryabova AE, Kondratenko VV. Modeling of milk powder self-compaction during storage. *Food industry*. 2024;(9):65–69. (In Russ.)] <https://doi.org/10.52653/PPI.2024.9.9.013>
12. Мяленко Д. М., Федотова О. Б., Агарков А. А., Полетаева П. А. Идентификация частиц микропластика в сухом молоке и сыворотке с применением оптической и электронной микроскопии. *Пищевая промышленность*. 2026. № 4. С. 24–29. [Myalenko DM, Fedotova OB, Agarkov AA, Poletaeva PA. Identification of microplastic particles in powdered milk and whey using optical and electron microscopy. *Food Industry*. 2026;(4):24–29. (In Russ.)] <https://doi.org/10.52653/PPI.2026.4.4.004>
13. Усов Д. Ю., Овчинников Е. А. Основные требования, предъявляемые к хранению продовольствия в особых климатических условиях. *Вестник Военной академии материально-технического обеспечения им. Генерала армии А. В. Хрулева*. 2016. № 3. С. 62–67. [Usov DYU, Ovchinnikov EA. Basic requirements for food storage under special climatic conditions. *Bulletin of the Military Academy of Logistics named after Army General A. V. Khrulev*. 2016;(3):62–67. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/YUDULJ>
14. Fan X, Wang C, Cheng M, Wei H, Gao X, *et al.* Markers and mechanisms of deterioration reactions in dairy products. *Food Engineering Reviews*. 2023;15:230–241. <https://doi.org/10.1007/s12393-023-09331-9>
15. Mahmoodani F, Perera CO, Abernethy G, Fedrizzi B, Chen H. Lipid oxidation and vitamin D3 degradation in simulated whole milk powder as influenced by processing and storage. *Food Chemistry*. 2018;261:149–156. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.04.043>
16. Sadiq FA, Flint S, He GQ. Microbiota of milk powders and the heat resistance and spoilage potential of aerobic spore-forming bacteria. *International Dairy Journal*. 2018;85:159–168. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2018.06.003>

17. Farag MA, Khalifa I, Gamal M, Bakry IA. The chemical composition, production technology, authentication, and QC analysis of dried milk. *International Dairy Journal*. 2022;133:105407. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2022.105407>
18. Ning M, He K, Zhang D, Liu S, Zhang Y, Min J, Wu R, Wu J, Zhang S. HS-SPME-GC-MS combined with multivariate statistical analysis reveals off-flavor composition and biomarker generation mechanism of whole milk powder. *Journal of Food Composition and Analysis*. 2025;137(B):106962. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2024.106962>
19. Park CW, Drake M. The effect of homogenization pressure on the flavor and flavor stability of whole milk powder. *Journal of Dairy Science*. 2017;100(7):5195–5205. <https://doi.org/10.3168/jds.2017-12544>
20. Sharma A, Jana AH, Chavan RS. Functionality of milk powders and milk-based powders for end use applications: A review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 2012;11(5):518–528. <https://doi.org/10.1111/j.1541-4337.2012.00199.x>
21. Li YH, Wang WJ, Guo L, Shao ZP, Xu XJ, *et al.* Comparative study on the characteristics and oxidation stability of commercial milk powder during storage. *Journal of Dairy Science*. 2019;102(10):8785–8797. <https://doi.org/10.3168/jds.2018-16089>
22. Phosanam A, Chandrapala J, Adhikari B, Zisu B. Storage stability of powdered dairy ingredients: A review. *Drying Technology*. 2021;39(11):1529–1553. <https://doi.org/10.1080/07373937.2021.1910955>
23. Silva MG, de Paula IL, Stephani R, Edwards HGM, de Oliveira LFC. Raman spectroscopy in the quality analysis of dairy products: A literature review. *Journal of Raman Spectroscopy*. 2021;52(12):2444–2478. <https://doi.org/10.1002/jrs.6214>
24. Shao Y, He L, Zheng H. Prediction of phase stability of UHT reconstituted skim milk after ambient storage using Raman spectroscopy. *International Dairy Journal*. 2025;161:106142. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2024.106142>
25. Huang W, Fan D, Li W, Meng Y, Liu TCY. Rapid evaluation of milk acidity and identification of milk adulteration by Raman spectroscopy combined with chemometrics analysis. *Vibrational Spectroscopy*. 2022;123:103440. <https://doi.org/10.1016/j.vibspec.2022.103440>
26. Барковская И. А., Туровская С. Н., Илларионова Е. Е., Ярышев В. Ю., Блиадзе В. Г., Кондратенко В. В. Сравнение методов ИК- и Раман-спектроскопии для оценки структурных изменений в молоке при тепловой обработке. *Food Metaengineering*. 2025. Т. 3. № 3. С. 21–38. [Barkovskaya IA, Turovskaya SN, Illarionova EE, Yaryshev VYu, Bliadze VG, Kondratenko VV. Comparison of IR and Raman spectroscopy methods for assessing structural changes in milk during heat treatment. *Food Metaengineering*. 2025;3(3):21–38. (In Russ.)] <https://doi.org/10.37442/fme.2025.3.91>
27. Khan HMH, McCarthy U, Esmonde-White K, Casey I, O'Shea N. Potential of Raman spectroscopy for in-line measurement of raw milk composition. *Food Control*. 2023;152:109862. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2023.109862>
28. Liang JH. Kinetics of fluorescence formation in whole milk powders during oxidation. *Food Chemistry*. 2000;71(4):459–463. [https://doi.org/10.1016/S0308-8146\(00\)00172-2](https://doi.org/10.1016/S0308-8146(00)00172-2)
29. Caponigro V, Marini F, Scannell AGM, Gowen AA. Single-drop technique for lactose prediction in dry milk on metallic surfaces: Comparison of Raman, FT-NIR, and FT-MIR spectral imaging. *Food Control*. 2023;144:109351. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2022.109351>
30. Bicknell-Brown E, Brown KG, Person WB. Configuration-dependent Raman bands of phospholipid surfaces: 2-head group and acyl stretching modes in the 800–900 cm<sup>-1</sup> region. *Journal of Raman Spectroscopy*. 1981;11(5):356–362. <https://doi.org/10.1002/jrs.1250110513>
31. Ashton L, Johannessen C, Goodacre R. The importance of protonation in the investigation of protein phosphorylation using Raman Spectroscopy and Raman Optical Activity. *Analytical Chemistry*. 2011;83(20):7978–7983. <https://doi.org/10.1021/ac202041f>
32. De Wolf JR, Lenferink A, Otto C, Bosschaart N. Evaluation of the changes in human milk lipid composition and conformational state with Raman spectroscopy during a breastfeed. *Biomedical Optics Express*. 2021;12(7):3934–3947. <https://doi.org/10.1364/BOE.427646>
33. El-Abassy RM, Eravuchira PJ, Donfack P, Von Der Kammer B, Materny A. Fast determination of milk fat content using Raman spectroscopy. *Vibrational Spectroscopy*. 2011;56(1):3–8. <https://doi.org/10.1016/j.vibspec.2010.07.001>
34. Fonseca CRD, Bordin K, Fernandes AM, Rodrigues CEDC, Corassin CH, *et al.* Storage of refrigerated raw goat milk affecting the quality of whole milk powder. *Journal of Dairy Science*. 2013;96(7):4716–4724. <https://doi.org/10.3168/jds.2012-6120>
35. Davis BI, Siddique A, Park YW. Effects of different storage time and temperature on physicochemical properties and fatty acid profiles of commercial powder goat milk products. *Journal of Advances in Dairy Research*. 2017;5(4):1000193. <https://doi.org/10.4172/2329-888X.1000193>
36. Christophe O, Reding R, Leblois J, Grelet C, Pittois D, Soyeurt H, Guignard C, Dehareng F. Going deeper in lipolysis: Prediction of individual free fatty acid contents in milk by mid-infrared spectroscopy. *Journal of Dairy Science*. 2025;108(12):13085–13098. <https://doi.org/10.3168/jds.2025-26829>



**Дополнительная информация об авторах / Additional information about the authors**

Барковская Ирина Александровна / Irina A. Barkovskaya ORCID 0000-0003-4779-1076; eLIBRARY SPIN 9404-4365  
Королёва Полина Игоревна / Polina I. Koroleva eLIBRARY SPIN 9646-9334  
Косарева Анастасия Валерьевна / Anastasia V. Kosareva  
Туровская Светлана Николаевна / Svetlana N. Turovskaya ORCID 0000-0002-5875-9875; eLIBRARY SPIN 6904-5308  
Рыбакова Елизавета Евгеньевна / Elizaveta E. Rybakova  
Ярышев Владислав Юрьевич / Vladislav Yu. Yaryshev ORCID 0009-0007-7848-4606; eLIBRARY SPIN 4906-1980  
Юрова Елена Анатольевна / Elena A. Yurova ORCID 0000-0003-3369-5673; eLIBRARY SPIN 3765-5798  
Семипятный Владислав Константинович / Vladislav K. Semipyatniy ORCID 0000-0003-1241-0026;  
eLIBRARY SPIN 4246-3862  
Галстян Арам Генрихович / Aram G. Galstyan ORCID 0000-0002-0786-2055; eLIBRARY SPIN 9355-5603

<https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-3-2662>  
<https://elibrary.ru/MDKVCX>

Оригинальная статья  
<https://fptt.ru>

## Ореховосеменное сырье как источник селена и его роль в обеспеченности населения микроэлементом



Н. И. Давыденко<sup>\*ID</sup>, А. Ю. Зирка<sup>ID</sup>, Д. Д. Мирный<sup>ID</sup>

Кемеровский государственный университет<sup>ROR</sup>, Кемерово, Россия

Поступила в редакцию: 27.05.2026

Принята после рецензирования: 31.08.2026

Принята к публикации: 01.09.2026

\*e-mail: nat1861@yandex.ru

© Н. И. Давыденко, А. Ю. Зирка, Д. Д. Мирный, 2026



### Аннотация.

Дефицит селена (Se) – актуальная медико-биологическая проблема: по данным отечественных исследований, более 80 % населения Российской Федерации имеют обеспеченность этим микроэлементом ниже оптимального уровня, что связывают в т. ч. с биогеохимическими особенностями почв страны. Цель исследования – проанализировать фактическое содержание селена в орехоплодных культурах и семенах, наиболее часто встречающихся в рационах населения РФ (на примере Кемеровской области – Кузбасса), для уточнения их реального вклада в обеспечение нутритивного статуса населения.

Объекты исследования – 28 образцов (14 видов орехов и семян, по 2 образца различного географического происхождения для каждого вида). Содержание Se определяли методом инверсионной вольтамперометрии (независимая пробоподготовка в трех повторностях; предел обнаружения 0,05–0,20 мкг/дм<sup>3</sup>, погрешность ≤ 10 % при  $P = 0,95$ ).

Среднее фактическое содержание Se по 24 образцам с количественно определяемым содержанием элемента (без двух образцов бразильского и двух образцов кедрового ореха) составило 17,59 мкг/100 г при среднем справочном значении 17,03 мкг/100 г. В кедровом орехе содержание Se было ниже предела обнаружения. Среди остальных продуктов значения варьировали от  $3,76 \pm 0,13$  мкг/100 г (миндаль) до  $50,38 \pm 0,36$  мкг/100 г (семена подсолнечника). В двух образцах бразильского ореха определено  $873,00 \pm 12,50$  и  $1409,52 \pm 12,50$  мкг/100 г; среднее значение составило 1141,26 мкг/100 г. Внутривидовые различия между двумя образцами одного вида не превышали 5 % (исключение – бразильский орех). Наибольшие отклонения средних фактических значений от справочных выявлены для фисташек (+132,4 %), пекана (+80,3 %), фундука (+45,1 %), кунжута (+26,6 %) и грецкого ореха (–26,1 %); наименьшие – для семян льна (–2,1 %) и арахиса (+3,2 %). Разведочный корреляционный анализ справочных значений белков и жиров не выявил статистически значимых связей с фактическим содержанием Se. Ни один из исследованных продуктов, кроме бразильского ореха, не обеспечивает принятый расчетный уровень 70 мкг Se/сутки в количестве, типичном для разового потребления.

Фактическое содержание селена в исследованной выборке орехов и семян существенно различается; применение справочных таблиц при оценке нутриентного состава рационов целесообразно дополнять аналитической верификацией конкретной продукции.

**Ключевые слова.** Селен, орехи, семена, инверсионная вольтамперометрия, нутритивный статус, дефицит селена

**Финансирование.** Работа выполнена в рамках гранта РНФ № 25-26-00617 «Применение систем искусственного интеллекта для оценки селенового статуса пищевых продуктов при формировании рационов лиц в период реабилитации после стрессовых нагрузок».

**Для цитирования:** Давыденко Н. И., Зирка А. Ю., Мирный Д. Д. Ореховосеменное сырье как источник селена и его роль в обеспеченности населения микроэлементом. Техника и технология пищевых производств. 2026. Т. 56. № 3. С. 623–638. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-3-2662>

## Nuts and Seeds as a Source of Selenium in the National Diet



Nataliia I. Davydenko\*, Anna Yu. Zirka, Daniil D. Mirnyj

Kemerovo State University, Kemerovo, Russia

Received: 27.05.2026

Revised: 31.08.2026

Accepted: 01.09.2026

\*e-mail: [nat1861@yandex.ru](mailto:nat1861@yandex.ru)

© N.I. Davydenko, A.Yu. Zirka, D.D. Mirnyj, 2026



### Abstract.

Selenium (Se) deficiency is a pressing biomedical issue across the Russian Federation. According to domestic epidemiological studies, over 80% of Russians have suboptimal levels of this essential trace element, a deficit partially attributed to the unique biogeochemistry of Russian soils. This article evaluates the selenium content in popular nut and seed varieties, using the Kemerovo Region as a case study to clarify their actual contribution to the national diet.

The study featured 28 samples representing 14 types of nuts and seeds, with two samples of differing geographic origins analyzed for each type. The selenium content was determined using stripping voltammetry (independent sample preparation in triplicate; detection limit: 0.05–0.2 µg/dm<sup>3</sup>; analytical error: ≤ 10% at  $p = 0.95$ ).

Excluding the two Brazil nut and two pine nut samples, the mean actual selenium content across the remaining 24 samples with quantifiable levels was 17.59 µg/100 g, compared to an established mean reference value of 17.03 µg/100 g. Selenium levels in pine nuts fell entirely below the detection limit. Among the other products, values ranged from 3.76 ± 0.13 µg/100 g (almonds) to 50.38 ± 0.36 µg/100 g (sunflower seeds). The two Brazil nut samples exhibited remarkably high levels of 873.00 ± 12.50 µg/100 g and 1,409.52 ± 12.50 µg/100 g, respectively, yielding a mean value of 1,141.26 µg/100 g. Except for the Brazil nuts, the intraspecific variation between samples of the same species remained below 5%. The most significant positive deviations from reference values occurred in pistachios (+132.4%), pecans (+80.3%), and hazelnuts (+45.1%), while the most pronounced negative deviation was observed in walnuts (–26.1%). The smallest deviations were documented for flaxseeds (–2.1%) and peanuts (+3.2%).

The correlation analysis revealed no statistically significant associations between reference protein or fat profiles and the actual selenium content. Crucially, single standard servings of none of the tested samples (with the sole exception of Brazil nuts) fulfilled the target daily intake of 70 µg of selenium.

Because the actual selenium content varied dramatically across the studied matrix, standard reference tables for dietary nutrient composition require ongoing analytical verification for specific food products.

**Keywords.** Selenium, nuts, seeds, stripping voltammetry, nutritional status, selenium deficiency

**Funding.** This research was supported by the Russian Science Foundation, Grant No. 25-26-00617: Artificial intelligence systems in assessing the selenium status of food products in diets for stress-induced strain rehabilitation.

**For citation:** Davydenko NI, Zirka AY, Mirnyj DD. Nuts and Seeds as a Source of Selenium in the National Diet. Food Processing: Techniques and Technology. 2026;56(3):623–638. (In Russ.) <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-3-2662>

### Введение

Селен (Se) – эссенциальный микроэлемент, занимающий уникальное положение в молекулярной биологии всех доменов жизни. Согласно данным [1], в организме человека функционируют 25 селенопротеинов, несущих селеноцистеин (21-ю аминокислоту) в активном центре; именно через них реализуется широкий спектр физиологических эффектов микроэлемента – от антиоксидантной и противовоспалительной защиты до продукции активного тиреоидного гормона [1]. Само включение селеноцистеина в белки закодировано на уровне генома: UGA-кодон мРНК при наличии специфических цис-активных SECIS-элементов и транс-активных факторов (SBP2, eEFSec) не прерывает трансляцию, а обеспечивает

встраивание 21-й аминокислоты [2, 3]. Е. Г. Варламова и В. Н. Мальцева [3] подчеркивают, что поддержание этой сложной молекулярной машины является крайне энергозатратным для клетки, что свидетельствует о критической биологической необходимости селенопротеинов.

Важнейшими функциональными группами селенопротеинов выступают глутатионпероксидазы (GPx1–GPx6), тиоредоксинредуктазы (TXNRD1–TXNRD3) и йодтиронин-дейодиназы (D1–D3). GPx катализуют восстановление перекиси водорода и липидных гидроперекисей, защищая мембраны и ДНК от окислительного повреждения, при этом GPx4 специфически элиминирует фосфолипидные гидроперекиси, что критически важно для предотвращения ферроптоза [1, 4].

TXNRD поддерживают тиоловый гомеостаз клетки и обеспечивают регенерацию аскорбата и убихинола [3]. Дейодиназы регулируют превращение тироксина (Т4) в биологически активный трийодтиронин (Т3), в связи с чем адекватная обеспеченность селеном является облигатным условием нормального функционирования щитовидной железы [1, 4]. М. Р. Rayman [5] выявил, что дефицит и избыток селена в равной степени способны приводить к неблагоприятным последствиям для здоровья, описывая эту зависимость как U-образную кривую.

Низкий статус селена ассоциирован с повышенным риском общей и онкологической смертности, нарушением иммунной функции и снижением когнитивных способностей [1, 5]. В последние годы появились исследования, доказывающие нейропротекторные свойства элемента: S. G. Alamir *et al.* [4] установили, что при системном дефиците селена мозг сохраняет его дольше других органов, а SELENOP – основной системный транспортер селена – доставляет его в нервную систему через рецепторы аroER2 и проявляет собственные нейропротекторные свойства [4]. У экспериментальных животных дефицит SELENOP проявляется спастичностью, нарушениями координации и спонтанными судорогами. Низкий статус элемента ассоциирован с ускоренным когнитивным снижением у пожилых людей и повышенным риском нейродегенеративных заболеваний – болезней Альцгеймера и Паркинсона [4].

Иммуномодулирующее действие селена включает усиление пролиферации активированных Т-клеток, цитотоксической активности NK-клеток и ускорение элиминации вирусов: даже у лиц с достаточным его статусом дополнительная супплементация достоверно усиливает пролиферацию активированных Т-клеток, цитотоксическую активность NK-клеток и ускоряет элиминацию вирусов [6]. В частности, в эксперименте с живой аттенуированной полиовакциной взрослые с невысоким исходным статусом селена, получавшие добавку 50 или 100 мкг/сутки, элиминировали вирус достоверно быстрее, чем участники группы плацебо [6]. М. Kieliszek & S. Włazejak в исследованиях [2, 7] систематизировали данные о значении Se в питании и обратили особое внимание на роль обогащенных селеном дрожжей как безопасного и эффективного его источника, а также на ключевые биологические функции Se в живых организмах.

**Глобальная и региональная эпидемиология дефицита селена.** Дефицит селена – общемировая проблема: согласно имеющимся данным, от 5 млн до 1 млрд человек в мире получают этот микроэлемент в количестве, недостаточном для поддержания оптимального здоровья [8]. Содержание селена в почвах вариabельно – от критически низких значений (менее 0,05 мг/кг) в отдельных регионах Китая, Финляндии и Новой Зеландии до 1200 мг/кг в селеноносных зонах США, Ирландии и Канады [9, 10]. М. Navarro-Alarcon

& С. Cabrera-Vique [10] подчеркивают, что именно геохимические характеристики почв определяют содержание элемента в продуктах питания и, следовательно, нутриентный статус проживающих в регионе популяций. Периодический мониторинг уровня селена в почвах и продуктах питания рассматривается как необходимое условие контроля состояния здоровья населения.

Субоптимальный статус селена широко распространен в большинстве европейских стран, при этом восточноевропейские популяции потребляют его меньше по сравнению с западноевропейскими [11]. Отмечается, что насыщение плазменной активности GPx достигается при концентрации селена в сыворотке крови около 90–100 мкг/л. М. Р. Rayman [12] дополнительно обращает внимание на широчайшую вариabельность содержания элемента в зерновых культурах – от 2,5 мкг/100 г сухой массы в Великобритании до 3000 мкг/100 г в высокоселеновых зонах США. Именно зерновые, составляющие диетическую основу большинства популяций, определяют различия в потреблении микроэлемента между странами.

М. Kieliszek *et al.* [8] провели анализ данных по странам Ближнего Востока и установили, что потребление и уровни Se в этих регионах недостаточны, а вариabельность между различными странами и районами крайне высока. Дефицит селена подтвержден также в странах Ближнего Востока и Северной Африки. В качестве причины указывается низкое содержание Se в почвах и, как следствие, в местных продуктах питания [13].

Российская Федерация относится к числу стран с преимущественно низким или умеренно низким содержанием селена в почвах. Более 80 % населения страны обеспечены этим микроэлементом ниже оптимального уровня [14]. При незначительном дефиците элемента в организме появляются метаболические, гормональные, иммунные и когнитивные нарушения, а нормализация его уровня может снижать риск сердечно-сосудистых заболеваний [14]. К классическим заболеваниям, связанным с тяжелым дефицитом Se, относятся болезнь Кешана – эндемическая кардиомиопатия, впервые описанная в Китае, – и болезнь Кашина-Бека – эндемическая остеоартропатия, встречающаяся в отдельных районах Китая и сопредельных территориях [1].

При анализе 14 национальных баз данных о потреблении пищи и концентрациях Se в продуктах в 12 европейских странах установлено, что дети дошкольного возраста в отдельных странах при верхнем сценарии нагрузки превышают допустимый уровень потребления 5 мкг/кг массы тела в сутки, хотя в большинстве случаев потребление селена находится ниже физиологически необходимых значений [15]. Подчеркивается значимость стандартизированного подхода к сбору данных о содержании микроэлемента в продуктах питания.

R. Lymbury *et al.* [16] продемонстрировали, что статус Se различается в зависимости от возраста, пола



и наличия сердечно-сосудистых заболеваний, что свидетельствует о необходимости дифференцированного подхода к оценке обеспеченности в различных группах населения.

**Пищевые источники, биодоступность и формы селена.** Основными источниками селена для человека служат пищевые продукты; в тонкой кишке абсорбируется около 80 % пищевого Se – в зависимости от вида потребляемых продуктов [10]. Наибольшее функциональное значение имеет химическая форма поступающего элемента. Органические формы – селенометионин (SeMet) и селеноцистеин (SeCys) – характеризуются биодоступностью 90–98 %, тогда как неорганические формы (селениты, селенаты) усваиваются значительно хуже и обладают более выраженной токсичностью [10, 11].

Растения различаются по способности накапливать селен в процессе роста и преобразовывать его неорганические формы в органические. В связи с этим селен-аккумулирующие растения рассматриваются как перспективный инструмент повышения содержания селена в пищевой цепи [17]. В зерновых и хлебопродуктах преобладают SeMet и SeCys, тогда как в обогащенных Se брокколи, чесноке и луке главной формой является Se-метилселеноцистеин (MSeC) [18]. В порядке убывания содержания селена в различных группах продуктов питания установлен следующий ряд: продукты животного происхождения > овощи > злаки > фрукты [18]. T. Filippini *et al.* [19] выявили достоверную связь между составом рациона и сывороточными уровнями различных форм Se: основным предиктором плазменного Se у жителей Северной Италии является потребление мяса, рыбы и яиц.

Продукты из США в целом содержат больше Se, чем аналогичные продукты из Австралии; наиболее низкие показатели – у продуктов из Великобритании и Новой Зеландии [9]. Это подчеркивает принципиальную невозможность использования единой глобальной базы данных о составе продуктов для оценки нутритивного статуса конкретных региональных популяций. Для поддержания максимальной активности Se-зависимых ферментов взрослому человеку необходимо не менее 40 мкг Se/сутки, а для редукции онкологического риска – до 300 мкг/сутки.

Среди растительных продуктов наибольшее содержание селена характерно для бразильского ореха (*Bertholletia excelsa*). Его содержание варьирует от 3 до 51 200 мкг/100 г сырой массы, что затрудняет использование продукта как стандартизированного источника селена [12]. По другим данным, диапазон составляет 85–686 мкг/100 г [8]. Согласно USDA FoodData Central (набор SR Legacy), справочное значение для бразильского ореха 1917 мкг/100 г<sup>1</sup>, тогда как британская база McCance & Widdowson приводит

254 мкг/100 г<sup>2</sup>. В настоящем исследовании в качестве справочного принято значение USDA 1917 мкг/100 г; оба полученных результата (873,00 и 1409,52 мкг/100 г) укладываются в опубликованный диапазон. При регулярном потреблении нескольких орехов в сутки возможно превышение безопасного уровня потребления Se (400 мкг/сутки)<sup>3</sup> [8, 12].

Фактическое содержание Se в орехах и семенах, представленных на потребительском рынке, нередко существенно расходится со справочными данными. Такие расхождения обусловлены комплексом факторов: геохимическими особенностями почв регионов произрастания, различиями в сортовом составе, условиями хранения и транспортировки, а также ограниченным числом образцов, по которым формировались справочные таблицы [9, 10]. Прямые аналитические исследования орехов и семян также демонстрируют выраженную межвидовую и межобразцовую вариабельность содержания Se [20, 21].

**Методы определения селена в пищевых продуктах и биомаркеры статуса.** Аналитическое определение Se в пищевых продуктах методически сложно из-за низких концентраций элемента и разнообразия его химических форм. А. В. Журавлев и др. [22] разработали и апробировали метод определения органического Se в форме SeMet в мясе ягнят, получавших рацион с органическим селеном, методом ВЭЖХ-МС/МС. По сравнению с атомно-абсорбционной спектроскопией метод характеризовался более низким пределом обнаружения (1 против 20 мкг/кг) и более высокой степенью извлечения ( $\geq 80$  против 20–60 %).

Для оценки обеспеченности организма Se применяются следующие биомаркеры: концентрация элемента в плазме крови, активность эритроцитарной GPx1, концентрация SELENOP в плазме, а также уровни Se в волосах, ногтях и моче. Единственного универсального маркера функционального статуса Se не существует: различные селенопротеины неодинаково реагируют на снижение поступления элемента [23]. Авторы рекомендуют использовать несколько маркеров одновременно; при этом SELENOP рассматривается как один из наиболее информативных показателей статуса Se, особенно при достаточной обеспеченности, тогда как плазменная GPx быстрее достигает плато [11, 23].

Показана применимость инверсионной вольтамперометрии для анализа пищевых продуктов – электрохимического метода, основанного на накоплении селена на электроде (обычно ртутном или золотом) с последующим электроокислением. К достоинствам метода относятся низкая стоимость оборудования, высокая чувствительность (до 0,05 мкг/л), а также возможность анализа в полевых условиях [24–26].

<sup>1</sup> USDA FoodData Central (SR Legacy; FDC ID 170569). Nuts, brazilnuts, dried, unblanched. URL: <https://fdc.nal.usda.gov/food-search/> (дата обращения: 19.05.2026).

<sup>2</sup> Public Health England. McCance and Widdowson's The Composition of Foods Integrated Dataset (CoFID), 2021. URL: <https://www.gov.uk/government/publications/composition-of-foods-integrated-dataset-cofid> (дата обращения: 27.07.2026).

<sup>3</sup> Там же.

Таким образом, совокупность опубликованных данных указывает, что дефицит селена – актуальная медико-биологическая проблема как в глобальном, так и в региональном масштабе, включая большинство территорий России [27, 28]. Это особенно значимо с учетом того, что даже при многолетнем высоком потреблении запасы селена в организме человека невелики и быстро истощаются при возникновении дефицита [29]. Орехоплодные культуры и семена могут рассматриваться как перспективный пищевой источник органических форм этого элемента, однако их реальный нутриционный вклад определяется фактическим содержанием Se, существенно варьирующим в зависимости от региона происхождения сырья. Отсутствие актуальных верифицированных данных о содержании Se в орехах и семенах, поступающих на российский рынок, делает актуальным проведение их аналитического скрининга с применением высокочувствительной аттестованной методики.

Цель исследования – проанализировать фактическое содержание селена в орехоплодных культурах и семенах, наиболее часто встречающихся в рационах населения РФ (на примере Кемеровской области – Кузбасса), для уточнения их реального вклада в обеспечение нутритивного статуса населения.

В связи с целью в рамках исследования поставлены следующие задачи:

- провести аналитический скрининг образцов орехов и семян различных стран происхождения, доступных на рынке РФ;
- дать сравнительный анализ полученных данных и оценить вклад рассматриваемой категории продуктов для коррекции дефицита селена в рационах.

Результаты работы могут стать основой для разработки научно обоснованных программ функционального питания, что позволит использовать орехоплодные культуры и семена как эффективный инструмент коррекции селенодефицита.

### Объекты и методы исследования

Объектами исследования служили ядра орехов и семена масличных культур, а также ядра арахиса, реализуемые в розничной торговле и широко потребляемые населением Российской Федерации. Перечень исследованных продуктов представлен в таблице 1.

Выбор указанных видов обусловлен их высокой долей в потребительской корзине, существенными различиями в ботаническом происхождении и агроэкологических условиях выращивания, что предполагает неодинаковую способность к аккумуляции селена из почвы.

Образцы отбирали в период с сентября 2025 г. по январь 2026 г. в розничных торговых сетях, магазинах здорового питания и на фермерских рынках (Кемерово, Россия) методом случайной выборки. Для каждого вида исследовали по 2 образца различного географического происхождения и/или товар-

ной формы. Всего в анализ включено 28 образцов. Каждый образец формировали из содержимого двух потребительских упаковок одной товарной партии; упаковки, входившие в один образец, относились к одной партии. География происхождения включала Россию (Краснодарский край, Республика Адыгея, Алтайский край, Республика Алтай), Турцию, Иран, Чили, США, Вьетнам, Индию, Перу, Боливию и Китай.

Для каждого вида орехов или семян случайным образом отбирали два независимых образца, различавшихся страной (регионом) происхождения и/или товарной формой. Каждый образец включал две упаковки одной товарной партии. Такой дизайн позволял описательно оценить различия между представленными на рынке вариантами продукции, но не предназначался для оценки межпартийной вариабельности.

Товарные формы образцов были максимально приближены к реальному потреблению и включали: сырые очищенные ядра (грецкий орех, миндаль, фундук, кешью, кедровый орех, бразильский орех) и орехи в скорлупе (грецкий орех, фундук, фисташка). Все образцы до момента исследования хранили в герметичных светонепроницаемых контейнерах в заводской упаковке при температуре 4–6 °С.

Непосредственно перед пробоподготовкой орехи, реализуемые в скорлупе, очищали вручную. Содержимое двух упаковок одной товарной партии объединяли и тщательно перемешивали, далее выделяли пробу массой около 50 г, которую двукратно измельчали на лабораторной мельнице с охлаждаемой камерой до получения однородного порошкообразного материала с размером частиц не более 0,5 мм. Гомогенизированные пробы помещали в герметичные пластиковые контейнеры и хранили в эксикаторе до минерализации.

Массовую долю селена в образцах орехов и семян определяли методом инверсионной вольтамперометрии в соответствии с аттестованной методикой (свидетельство об аттестации 08-47/132, ФР.1.31.2003.00935). Метод основан на восстановлении ионов Se (IV) до элементного селена и концентрировании его на поверхности индикаторного электрода в виде селенидов металлов с последующей регистрацией тока анодного растворения в режиме линейной развертки потенциала. Аналитическим сигналом служила высота (площадь) пика селена на вольтамперограмме и пропорциональная его концентрации в растворе.

Измерения выполняли на вольтамперометрическом анализаторе «СТА-1» (ООО «ИТМ», Россия) с трехэлектродной электрохимической ячейкой и программным управлением. Индикаторным электродом служил ртутно-пленочный электрод на серебряной подложке; вспомогательным электродом и электродом сравнения – хлоридсеребряные электроды.

В качестве реактива использовали стандартный образец состава раствора ионов Se (IV) с концентрацией 1 г/дм<sup>3</sup> (ГСО), бидистиллированную воду,

Таблица 1. Характеристика исследованных образцов

Table 1. Samples' profiles

| Вид                                                    | Страна (регион) происхождения | Товарная форма  | Технологическая обработка |
|--------------------------------------------------------|-------------------------------|-----------------|---------------------------|
| Кокос ( <i>Cocos nucifera</i> L.)                      | Шри-Ланка                     | Копра (стружка) | Измельченный, сушеный     |
| Кокос ( <i>Cocos nucifera</i> L.)                      | Индонезия                     | Копра (стружка) | Измельченный, сушеный     |
| Орех грецкий ( <i>Juglans regia</i> L.)                | Россия (Краснодарский край)   | Ядро            | Очищенный, необжаренный   |
| Орех грецкий ( <i>Juglans regia</i> L.)                | Чили                          | Ядро            | Очищенный, необжаренный   |
| Семена подсолнечника ( <i>Helianthus annuus</i> L.)    | Россия (Краснодарский край)   | Ядро            | Очищенные, необжаренные   |
| Семена подсолнечника ( <i>Helianthus annuus</i> L.)    | Аргентина                     | Ядро            | Очищенные, необжаренные   |
| Фисташки ( <i>Pistacia vera</i> L.)                    | Иран                          | Ядро            | Очищенные, необжаренные   |
| Фисташки ( <i>Pistacia vera</i> L.)                    | Турция                        | В скорлупе      | Необработанные            |
| Фундук ( <i>Corylus avellana</i> L.)                   | Турция                        | Ядро            | Очищенный, необжаренный   |
| Фундук ( <i>Corylus avellana</i> L.)                   | Россия (Краснодарский край)   | В скорлупе      | Необработанный            |
| Арахис ( <i>Arachis hypogaea</i> L.)                   | Китай                         | Ядро            | Очищенный, необжаренный   |
| Арахис ( <i>Arachis hypogaea</i> L.)                   | Аргентина                     | Ядро            | Очищенный, необжаренный   |
| Кедровый орех ( <i>Pinus sibirica</i> Du Tour)         | Россия (Алтайский край)       | Ядро            | Очищенный, необжаренный   |
| Кедровый орех ( <i>Pinus sibirica</i> Du Tour)         | Россия (Республика Алтай)     | Ядро            | Очищенный, необжаренный   |
| Кешью ( <i>Anacardium occidentale</i> L.)              | Вьетнам                       | Ядро            | Очищенный, необжаренный   |
| Кешью ( <i>Anacardium occidentale</i> L.)              | Индия                         | Ядро            | Очищенный, необжаренный   |
| Кунжут ( <i>Sesamum indicum</i> L.)                    | Индия                         | Семена целые    | Необработанный            |
| Кунжут ( <i>Sesamum indicum</i> L.)                    | Эфиопия                       | Семена целые    | Необработанный            |
| Миндаль ( <i>Prunus dulcis</i> (Mill.) D. A. Webb)     | США (Калифорния)              | Ядро            | Очищенный, необжаренный   |
| Миндаль ( <i>Prunus dulcis</i> (Mill.) D. A. Webb)     | Испания                       | Ядро            | Очищенный, необжаренный   |
| Пекан ( <i>Carya illinoensis</i> (Wangenh.) K. Koch)   | США                           | Ядро            | Очищенный, необжаренный   |
| Пекан ( <i>Carya illinoensis</i> (Wangenh.) K. Koch)   | Мексика                       | Ядро            | Очищенный, необжаренный   |
| Семена льна пищевые ( <i>Linum usitatissimum</i> L.)   | Россия (Алтайский край)       | Семена целые    | Необработанный            |
| Семена льна пищевые ( <i>Linum usitatissimum</i> L.)   | Канада                        | Семена целые    | Необработанный            |
| Семена тыквы ( <i>Cucurbita pepo</i> L.)               | Китай                         | Ядро            | Очищенный, необжаренный   |
| Семена тыквы ( <i>Cucurbita pepo</i> L.)               | Россия (Краснодарский край)   | Ядро            | Очищенный, необжаренный   |
| Бразильский орех ( <i>Bertholletia excelsa</i> Bonpl.) | Перу                          | Ядро            | Очищенный, необжаренный   |
| Бразильский орех ( <i>Bertholletia excelsa</i> Bonpl.) | Боливия                       | Ядро            | Очищенный, необжаренный   |

концентрированную азотную кислоту (ос.ч.), пероксид водорода (30 %, ос.ч.), хлороводородную кислоту (ос.ч.), фоновый электролит (0,1 М HCl с добавлением ионов меди). Для очистки растворов от растворенного кислорода применяли инертный газ (азот).

Из гомогенизированного материала для каждой из трех независимых повторностей отдельно отбирали навеску массой 0,5 г с точностью до 0,0001 г и помещали в кварцевую колбу. Для каждой навески независимо выполняли полный цикл пробоподготовки и минерализации «мокрым» способом в системе «ТЭМОС-Экспресс». Нагрев проводили ступенчато до получения прозрачного раствора. Для восстановления Se (VI) до электроактивной формы Se (IV) аликвоту минерализата объемом 2–5 см<sup>3</sup> подкисляли 1 см<sup>3</sup> концентрированной HCl и нагревали при

70–80 °C в течение 20–30 мин. Результат для каждого образца рассчитывали как среднее трех независимых определений (n = 3).

Перед каждым измерением проводили регенерацию (очистку) индикаторного электрода путем его кратковременной поляризации при высоком анодном потенциале в фоновом растворе. Содержание селена определяли методом добавок стандартного раствора: регистрировали вольтамперограмму аликвоты минерализата, затем вносили известную добавку аттестованного раствора Se (IV) и повторяли измерение. Концентрацию селена в пробе определяли автоматически.

Предел обнаружения селена в растворе составлял 0,05–0,20 мкг/дм<sup>3</sup>, что в пересчете на сухую пробу позволяло надежно определять селен на уровне

от 0,5 мкг/100 г. Относительная погрешность определения не превышала 5–10 % при доверительной вероятности  $P = 0,95$ . Метод обладает высокой селективностью при условии надлежащей пробоподготовки и позволяет исключить мешающее влияние сопутствующих элементов за счет выбора потенциала электролиза и состава фоновое электролита. Данная методика обеспечивает необходимую чувствительность и точность для оценки селенового статуса пищевых продуктов с низким и умеренным содержанием микроэлемента, что подтверждено результатами, представленными в настоящей работе. Статистическую обработку выполняли в Statistica 10 (StatSoft Inc., США). Для сравнения справочного и фактического содержания использовали методы расчета абсолютного и относительного отклонения.

Для оценки тесноты линейной связи использовался коэффициент корреляции Пирсона ( $r$ ), для оценки монотонной связи по рангам – коэффициент Спирмена ( $\rho$ ). Статистическую значимость корреляций проверяли по  $t$ -критерию при уровне значимости  $\alpha = 0,05$  (критическое значение  $|r|$  при  $n = 12$  составляет 0,576). Для каждой пары переменных построена линейная регрессионная модель (1), характеризующаяся нанесением 95 % доверительного интервала, все расчеты выполнены средствами Python (scipy.stats, numpy) при объеме выборки  $n = 12$ :

$$Se = a \times X + b \quad (1)$$

где  $Se$  – расчетное содержание селена, мкг/100 г;  $a$  – коэффициент наклона линейной регрессии;  $X$  – справочное содержание белков или жиров, г/100 г;  $b$  – свободная переменная, мкг/100 г.

### Результаты и их обсуждение

Содержание селена определено в 28 образцах, представлявших 14 видов орехов и семян (по 2 образца различного географического происхождения и/или товарной формы на вид), закупленных в розничной торговой сети и соответствовавших требованиям действующей нормативной документации (ГОСТ, ТУ, СТО) (табл. 2).

При выборе справочных источников для сопоставления с результатами анализа содержания селена учитывали следующие критерии: полнота номенклатуры, актуальность и международная представительность данных, нейтральность и приемлемость источников для российской научно-практической среды, а также соответствие происхождению исследуемых образцов.

Справочник «Химический состав российских пищевых продуктов» под редакцией И. М. Скурихина и В. А. Тутельяна<sup>4</sup> – широко используемый отечественный источник данных о составе пищевых продуктов.

<sup>4</sup> Скурихин И. М., Тутельян В. А. Таблицы химического состава и калорийности российских продуктов питания. М.: ДеЛи принт, 2007. 276 с.

Однако он имеет существенные ограничения: сведения по микроэлементному составу, в т. ч. по селену, получены преимущественно в 1980–1990 гг. База сформирована по результатам анализа отечественного сырья, тогда как значительная часть исследованных образцов произведена в других странах. Помимо этого, номенклатура орехов и семян ограничена и не охватывает всего ассортимента настоящего исследования.

По данным научной литературы, основной массив систематических первичных исследований количественного содержания  $Se$  в орехах и семенах сосредоточен на бразильском орехе<sup>5</sup> [8, 12]. Опубликованы многочисленные результаты, демонстрирующие чрезвычайно высокую географическую вариабельность содержания элемента. По большинству других видов орехов и семян данные существенно более ограничены, разрозненны и получены на образцах различного происхождения [9, 10], поэтому их прямое сопоставление затруднено. Вместе с тем отдельные первичные аналитические исследования включали бразильский и грецкий орехи, кешью и пекан, а также более широкую выборку из 11 видов орехов и семян тыквы и подсолнечника [20, 21]. В связи с этим в настоящей работе справочные значения используются как ориентиры, а не как абсолютные нормативы.

В результате в качестве основных источников сравнения данных выбраны:

- для орехов и семян российского происхождения справочные значения принимали преимущественно по широко используемому отечественному источнику<sup>6</sup>. Эти значения рассматривали как ориентировочные и не приравнивали к обязательным нормативам;
- для продуктов иностранного происхождения использовали ориентировочные значения из таблиц состава пищевых продуктов, представленных в глобальном каталоге FAO/INFOODS7, который является каталогом национальных, региональных и международных баз, а не единой базой усредненных значений, что подтверждает происхождение справочного массива, но не репрезентативность одного значения для конкретной страны.

Необходимо учитывать, что содержание селена в растительных продуктах в значительной мере определяется геохимическими условиями региона произрастания. Поэтому справочные значения следует рассматривать как ориентировочные, а выявленные отклонения могут отражать совокупное влияние происхождения сырья, сортовых и технологических особенностей, различий между справочными базами и аналитической неопределенности; приписывать их исключительно условиям произрастания нельзя.

<sup>5</sup> USDA FoodData Central...

<sup>6</sup> Там же.

<sup>7</sup> Food and Agriculture Organization of the United Nations. Global directory of food composition tables and databases. URL: <https://www.fao.org/food-composition/tables-and-databases/en> (дата обращения: 27.06.2026).



Таблица 2. Результаты определения селена в исследованных образцах

Table 2. Selenium content in nuts and seeds

| Продукт                                             | Страна (регион) происхождения | Товарная форма        | Справочное значение, мкг/100 г | Источник                                                           | Фактическое значение, мкг/100 г | Абсолютное отклонение | Относительное отклонение, % |
|-----------------------------------------------------|-------------------------------|-----------------------|--------------------------------|--------------------------------------------------------------------|---------------------------------|-----------------------|-----------------------------|
| Кокос ( <i>Cocos nucifera</i> L.)                   | Шри-Ланка                     | Стружка сухая         | 16,1                           | Справочник «Химический состав российских пищевых продуктов» (2007) | 19,95 ± 0,56                    | +3,85                 | +23,91                      |
| Кокос ( <i>Cocos nucifera</i> L.)                   | Индонезия                     | Стружка сухая         | 16,1                           | Каталог FAO/ INFOODS                                               | 19,01 ± 0,56                    | +2,91                 | +18,07                      |
| Орех грецкий ( <i>Juglans regia</i> L.)             | Россия (Краснодарский край)   | Ядро сырое            | 17,0                           | Справочник «Химический состав российских пищевых продуктов» (2007) | 12,86 ± 0,44                    | –4,14                 | –24,35                      |
| Орех грецкий ( <i>Juglans regia</i> L.)             | Чили                          | Ядро сырое            | 17,0                           | Каталог FAO/ INFOODS                                               | 12,26 ± 0,44                    | –4,74                 | –27,88                      |
| Семена подсолнечника ( <i>Helianthus annuus</i> L.) | Россия (Краснодарский край)   | Ядро сырое            | 59,5                           | Справочник «Химический состав российских пищевых продуктов» (2007) | 50,38 ± 0,36                    | –9,12                 | –15,33                      |
| Семена подсолнечника ( <i>Helianthus annuus</i> L.) | Аргентина                     | Ядро сырое            | 59,5                           | Каталог FAO/ INFOODS                                               | 48,02 ± 0,36                    | –11,48                | –19,29                      |
| Фисташки ( <i>Pistacia vera</i> L.)                 | Иран                          | Ядро сырое            | 3,7                            | Каталог FAO/ INFOODS                                               | 8,80 ± 0,47                     | +5,10                 | +137,84                     |
| Фисташки ( <i>Pistacia vera</i> L.)                 | Турция                        | В скорлупе, сырые     | 3,7                            | Каталог FAO/ INFOODS                                               | 8,39 ± 0,47                     | +4,69                 | +126,76                     |
| Фундук ( <i>Corylus avellana</i> L.)                | Турция                        | Ядро сырое            | 4,0                            | Каталог FAO/ INFOODS                                               | 5,94 ± 0,50                     | +1,94                 | +48,50                      |
| Фундук ( <i>Corylus avellana</i> L.)                | Россия (Краснодарский край)   | В скорлупе            | 4,0                            | Справочник «Химический состав российских пищевых продуктов» (2007) | 5,67 ± 0,50                     | +1,67                 | +41,75                      |
| Арахис ( <i>Arachis hypogaea</i> L.)                | Китай                         | Ядро сырое            | 7,2                            | Каталог FAO/ INFOODS                                               | 7,61 ± 0,26                     | +0,41                 | +5,69                       |
| Арахис ( <i>Arachis hypogaea</i> L.)                | Аргентина                     | Ядро сырое            | 7,2                            | Каталог FAO/ INFOODS                                               | 7,25 ± 0,26                     | +0,05                 | +0,69                       |
| Кедровый орех ( <i>Pinus sibirica</i> Du Tour)      | Россия (Алтайский край)       | Ядро сырое            | 0,7                            | Справочник «Химический состав российских пищевых продуктов» (2007) | Ниже предела обнаружения        | –                     | –                           |
| Кешью ( <i>Anacardium occidentale</i> L.)           | Вьетнам                       | Ядро сырое            | 19,7                           | Каталог FAO/ INFOODS                                               | 21,63 ± 0,86                    | +1,93                 | +9,80                       |
| Кешью ( <i>Anacardium occidentale</i> L.)           | Индия                         | Ядро сырое            | 19,7                           | Каталог FAO/ INFOODS                                               | 20,61 ± 0,86                    | +0,91                 | +4,62                       |
| Кунжут ( <i>Sesamum indicum</i> L.)                 | Индия                         | Семена необработанные | 34,4                           | Каталог FAO/ INFOODS                                               | 44,58 ± 0,57                    | +10,18                | +29,59                      |
| Кунжут ( <i>Sesamum indicum</i> L.)                 | Эфиопия                       | Семена необработанные | 34,4                           | Каталог FAO/ INFOODS                                               | 42,49 ± 0,57                    | +8,09                 | +23,52                      |
| Миндаль ( <i>Prunus dulcis</i> (Mill.) D. A. Webb)  | США (Калифорния)              | Семена необработанные | 4,1                            | Каталог FAO/ INFOODS                                               | 3,95 ± 0,13                     | –0,15                 | –3,66                       |

Продолжение таблицы 2

| Продукт                                                | Страна (регион) происхождения | Товарная форма | Справочное значение, мкг/100 г | Источник                                                           | Фактическое значение, мкг/100 г | Абсолютное отклонение | Относительное отклонение, % |
|--------------------------------------------------------|-------------------------------|----------------|--------------------------------|--------------------------------------------------------------------|---------------------------------|-----------------------|-----------------------------|
| Миндаль ( <i>Prunus dulcis</i> (Mill.) D. A. Webb)     | Испания                       | Ядро сырое     | 4,1                            | Каталог FAO/ INFOODS                                               | 3,76 ± 0,13                     | –0,34                 | –8,29                       |
| Пекан ( <i>Carya illinoensis</i> (Wangenh.) K. Koch)   | США                           | Ядро сырое     | 3,8                            | Каталог FAO/ INFOODS                                               | 7,01 ± 0,25                     | +3,21                 | +84,47                      |
| Пекан ( <i>Carya illinoensis</i> (Wangenh.) K. Koch)   | Мексика                       | Ядро сырое     | 3,8                            | Каталог FAO/ INFOODS                                               | 6,68 ± 0,25                     | +2,88                 | +75,79                      |
| Семена льна пищевые ( <i>Linum usitatissimum</i> L.)   | Россия (Алтайский край)       | Семена целые   | 25,4                           | Справочник «Химический состав российских пищевых продуктов» (2007) | 25,46 ± 0,55                    | +0,06                 | +0,24                       |
| Семена льна пищевые ( <i>Linum usitatissimum</i> L.)   | Канада                        | Семена целые   | 25,4                           | Каталог FAO/ INFOODS                                               | 24,27 ± 0,55                    | –1,13                 | –4,45                       |
| Семена тыквы ( <i>Cucurbita pepo</i> L.)               | Китай                         | Ядро сырое     | 9,4                            | Каталог FAO/ INFOODS                                               | 7,99 ± 0,67                     | –1,41                 | –15,00                      |
| Семена тыквы ( <i>Cucurbita pepo</i> L.)               | Россия (Краснодарский край)   | Ядро сырое     | 9,4                            | Справочник «Химический состав российских пищевых продуктов» (2007) | 7,62 ± 0,67                     | –1,78                 | –18,94                      |
| Бразильский орех ( <i>Bertholletia excelsa</i> Bonpl.) | Перу                          | Ядро сырое     | 1917                           | Каталог FAO/ INFOODS                                               | 873,00 ± 12,50                  | –1044,00              | –54,46                      |
| Бразильский орех ( <i>Bertholletia excelsa</i> Bonpl.) | Боливия                       | Ядро сырое     | 1917                           | Каталог FAO/ INFOODS                                               | 1409,52 ± 12,50                 | –507,48               | –26,47                      |

Примечание: для каждого вида орехов и семян исследовано по два образца различного географического происхождения и/или товарной формы. Каждый образец формировали из двух упаковок одной товарной партии. Различия между парными образцами одного вида не превышали 5 %, кроме бразильского ореха. Для последующих расчетов использовали среднее арифметическое двух образцов каждого вида. Полученные парные значения характеризуют только исследованную выборку и не позволяют оценить межпартийную вариабельность продукции.

Note: Two samples of different geographical origin and/or packaging were examined for each type of nuts and seeds. Each sample was formed from two packages of the same product batch. The differences between the paired samples of the same type were below 5%, except for Brazil nuts. The arithmetic mean of the two samples of each type was used for subsequent calculations. The paired values cannot be used to assess inter-batch variability.

Наибольшее содержание селена установлено в бразильском орехе: среднее значение двух образцов составило 1141,26 мкг/100 г, что примерно в 64,9 раза превышает среднее значение по образцам остальных видов (17,59 мкг/100 г). Отклонения фактического содержания селена от справочных значений для отдельных продуктов значительны и согласуются с данными о зависимости накопления Se растениями от геохимических характеристик почв [9, 10].

Наибольшее среднее фактическое содержание Se среди видов без учета бразильского ореха установлено в семенах подсолнечника (49,20 мкг/100 г) и кунжута (43,54 мкг/100 г). Для семян подсолнечника значение ниже справочного на 17,3 %, тогда как для кунжута – выше на 26,6 %. Такие расхождения могут быть

связаны с различиями географического происхождения, сортового состава и агроэкологических условий выращивания [9]. Максимальное превышение справочных значений выявлено для фисташек: среднее фактическое содержание – 8,60 мкг/100 г при справочном значении 3,7 мкг/100 г (+132,4 %). Для пекана превышение составило 80,3 % (6,85 против 3,80 мкг/100 г), для фундука – 45,1 % (5,81 против 4,00 мкг/100 г), для кокосовой стружки – 21,0 % (19,48 против 16,10 мкг/100 г).

Наиболее близкие к справочным средние значения получены для семян льна (24,87 против 25,40 мкг/100 г; –2,1 %) и арахиса (7,43 против 7,20 мкг/100 г; +3,2 %). Для миндаля отклонение составило –6,0 % (3,86 против 4,10 мкг/100 г), для кешью – +7,2 % (21,12 против 19,70 мкг/100 г).

Отдельного внимания заслуживает отсутствие детектируемого содержания селена в кедровом орехе при справочном значении 0,7 мкг/100 г, которое находится на границе чувствительности применявшегося метода (0,5 мкг/100 г), что требует дополнительной верификации с использованием методик с более низким пределом обнаружения. Полученный результат может быть связан с низким содержанием Se в почвах происхождения сырья [9, 10], однако дизайн исследования не позволяет установить причину недетектируемого уровня.

Наблюдаемые различия между фактическими и справочными данными могут быть обусловлены геохимическими особенностями почв, сортовым составом, условиями хранения и транспортировки, а также ограниченным объемом выборок, использованных при формировании справочных таблиц [9, 10]. Полученные результаты согласуются с выводом [9] о необходимости актуализации баз данных о составе пищевых продуктов с учетом происхождения сырья.

**Корреляционный анализ фактического содержания селена с содержанием белков и жиров в орехах и семенах.** Корреляционный блок выполнен как разведочный анализ вторичных данных. Для каждого вида

использовали среднее фактическое содержание Se по двум образцам и справочные значения содержания белков и жиров; фактическое содержание макронутриентов в исследованных пробах не определяли. Бразильский орех исключили как статистический выброс: после исключения кедрового ореха, не имевшего количественного значения, критерий Граббса составил  $G = 3,32$  при  $G_{\text{крит}} = 2,462$  ( $n = 13$ ;  $\alpha = 0,05$ ). Среднее содержание Se в бразильском орехе (1141,26 мкг/100 г) в 23,2 раза превышало следующее по величине значение. Кедровый орех сохранили в описательной части и таблице 2, но исключили из корреляционного анализа (табл. 3), поскольку содержание Se в обоих образцах было ниже предела обнаружения, а подстановка нулевого значения создавала бы систематическую погрешность. Итоговая выборка разведочного корреляционного анализа составила  $n = 12$ . Исходные данные представлены в таблице 3, а коэффициенты корреляции – в таблице 4.

Разведочный анализ не выявил статистически значимой связи между фактическим содержанием Se и справочным содержанием белков (рис. 1):  $r = 0,055$  ( $p = 0,865$ );  $\rho = 0,196$  ( $p = 0,542$ ). Уравнение линейной регрессии (2):

Таблица 3. Исходные данные разведочного корреляционного анализа (справочные значения белков и жиров;  $n = 12$ )

Table 3. Initial data for exploratory correlation analysis (reference values for proteins and fats;  $n = 12$ )

| Продукт                                                 | Белки, г/100 г | Жиры, г/100 г | Фактическое содержание Se, мкг/100 г |
|---------------------------------------------------------|----------------|---------------|--------------------------------------|
| Кокосовая стружка (сушеная) ( <i>Cocos nucifera</i> L.) | 13,0           | 65,0          | 19,48                                |
| Орех грецкий ( <i>Juglans regia</i> L.)                 | 15,2           | 65,2          | 12,56                                |
| Семена подсолнечника ( <i>Helianthus annuus</i> L.)     | 20,7           | 52,9          | 49,20                                |
| Фисташки ( <i>Pistacia vera</i> L.)                     | 20,2           | 45,3          | 8,60                                 |
| Фундук ( <i>Corylus avellana</i> L.)                    | 15,0           | 61,5          | 5,81                                 |
| Арахис ( <i>Arachis hypogaea</i> L.)                    | 26,3           | 45,2          | 7,43                                 |
| Кешью ( <i>Anacardium occidentale</i> L.)               | 18,5           | 48,5          | 21,12                                |
| Кунжут ( <i>Sesamum indicum</i> L.)                     | 20,5           | 61,2          | 43,54                                |
| Миндаль ( <i>Prunus dulcis</i> (Mill.) D. A. Webb)      | 19,0           | 54,0          | 3,86                                 |
| Пекан ( <i>Carya illinoensis</i> (Wangenh.) K. Koch)    | 9,2            | 71,2          | 6,85                                 |
| Семена льна пищевые ( <i>Linum usitatissimum</i> L.)    | 18,3           | 42,2          | 24,87                                |
| Семена тыквы ( <i>Cucurbita pepo</i> L.)                | 30,2           | 49,1          | 7,81                                 |

Таблица 4. Коэффициенты разведочного корреляционного анализа фактического содержания Se и справочного макронутриентного состава ( $n = 12$ )

Table 4. Coefficients of exploratory correlation analysis of the actual Se content and reference macro-nutrient composition ( $n = 12$ )

| Исследуемые переменные | Коэффициент корреляции Пирсона ( $r$ ) | Коэффициент Спирмена ( $\rho$ ) | $p$ (Пирсон) |
|------------------------|----------------------------------------|---------------------------------|--------------|
| Se – Белки, г/100 г    | 0,055                                  | 0,196                           | 0,865        |
| Se – Жиры, г/100 г     | –0,030                                 | –0,224                          | 0,927        |

Примечание:  $p$  – двустороннее  $p$ -значение для проверки нулевой гипотезы об отсутствии линейной корреляции Пирсона; при  $\alpha = 0,05$  линейные связи статистически незначимы (критическое  $|r| = 0,576$  при  $n = 12$ ).

Note:  $p$  – two-sided  $p$ -value for testing the null hypothesis of no Pearson linear correlation. The linear relationships are not statistically significant at  $\alpha = 0.05$  (critical  $|r| = 0.576$  for  $n = 12$ ).

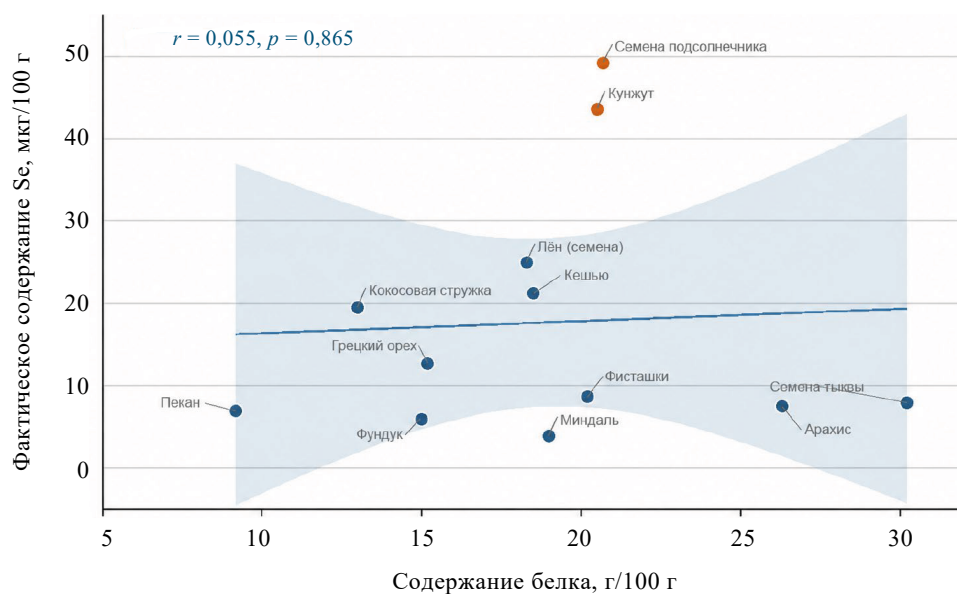


Рисунок 1. Разведочный анализ связи фактического содержания Se со справочным содержанием белков (n = 12). Синяя линия – линейный тренд ( $Se = 0,148 \times \text{Белки} + 14,81$ ); затененная область – 95 % доверительный интервал

Figure 1. Actual selenium content vs. reference protein content (n = 12). Blue line: Linear trend ( $Se = 0.148 \times \text{Protein} + 14.81$ ); shaded area: 95% confidence interval

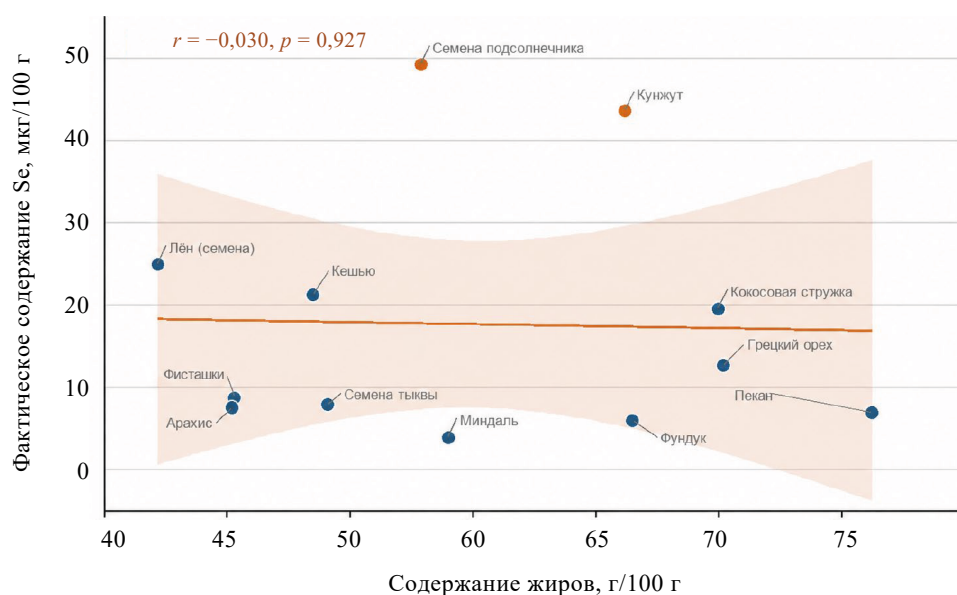


Рисунок 2. Разведочный анализ связи фактического содержания Se со справочным содержанием жиров (n = 12). Сплошная оранжевая линия – линейный тренд ( $Se = -0,047 \times \text{Жиры} + 20,19$ ); затененная область – 95 % доверительный интервал

Figure 2. Actual selenium content vs. reference fat content (n = 12). The solid orange line is the linear trend ( $Se = -0.047 \times \text{Fat} + 20.19$ ); the shaded area represents the 95% confidence interval

$$Se = 0,148 \times \text{Белки} + 14,81 \quad (2)$$

Результат относится к данной ограниченной выборке и не позволяет оценивать связь Se с фактически измеренным белком в конкретных пробах.

Посредством разведочного анализа не выявлено статистически значимой связи фактического содержания Se со справочным содержанием жиров (рис. 2):

$r = -0,030$  ( $p = 0,927$ );  $\rho = -0,224$  ( $p = 0,484$ ). Полученное уравнение регрессии (3):

$$Se = -0,047 \times \text{Жиры} + 20,19 \quad (3)$$

Наблюдаемая слабая отрицательная направленность статистически незначима и не должна интерпретироваться как биологическая закономерность.



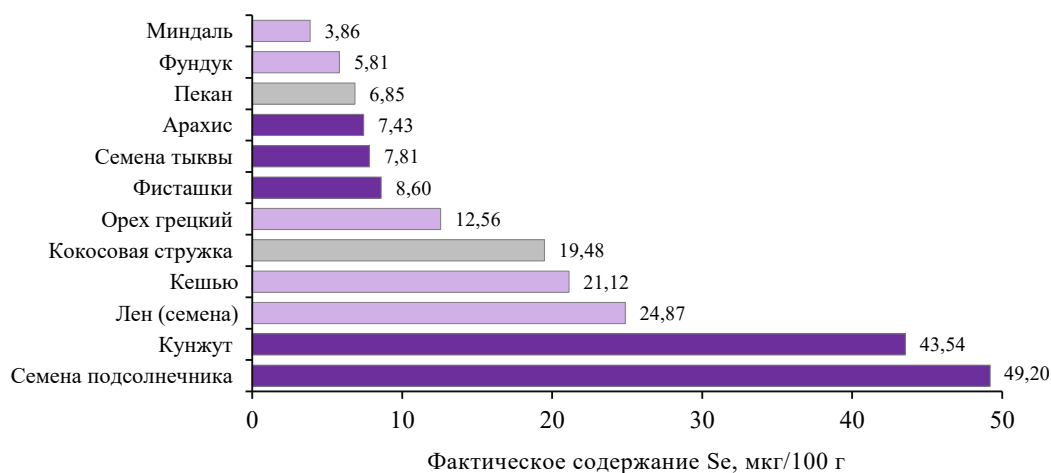


Рисунок 3. Фактическое содержание Se в исследуемых образцах (без бразильского и кедрового орехов;  $n = 12$ ). Продукты ранжированы по возрастанию содержания Se. Цвет отражает условные категории справочного содержания белка: фиолетовый – высокий ( $\geq 20$  г/100 г); лиловый – средний (от 15 включительно до 20 г/100 г не включительно); серый – низкий ( $< 15$  г/100 г)

Figure 3. Actual selenium content across samples (excluding Brazil nuts and pine nuts;  $n = 12$ ). The products are ranked in ascending order of selenium content. The reference protein levels are color-coded: purple – high ( $\geq 20$  g/100 g); lilac – medium ( $15 \leq \text{protein} < 20$  g/100 g), gray – low ( $< 15$  g/100 g)

В исследованной выборке (рис. 3) средние значения Se варьировали от 3,86 мкг/100 г для миндаля до 49,20 мкг/100 г для семян подсолнечника. Расположение продуктов с различным справочным содержанием белка в разных частях ранга визуально не демонстрирует устойчивой зависимости, однако эта иллюстрация имеет описательный характер и не заменяет анализ фактически измеренного макронутриентного состава.

В основной разведочной выборке ( $n = 12$ ) статистически значимые связи Se со справочным содержанием белков и жиров не выявлены. Анализ чувствительности показал, что включение бразильского ореха ( $n = 13$ ) меняет коэффициент Пирсона для белка с 0,055 до  $-0,225$ , а для жиров – с  $-0,030$  до 0,343; оба значения остаются ниже критического  $|r| = 0,553$ . Изменение направления коэффициентов указывает на высокую чувствительность результатов к единичному экстремальному наблюдению. Поэтому результаты следует рассматривать исключительно как разведочные: они не доказывают отсутствия биохимических связей и требуют проверки на расширенной выборке с прямым определением белков, жиров и показателей антиоксидантной активности.

Бразильский орех исключен из основной корреляционной модели как статистически подтвержденный выброс ( $G = 3,32 > G_{\text{крит}} = 2,462$ ;  $n = 13$ ;  $\alpha = 0,05$ ), но включен в анализ чувствительности. Среднее содержание Se составило 1141,26 мкг/100 г при справочном содержании белков 14,3 г/100 г и жиров 67,1 г/100 г. Полученные данные иллюстрируют экстремальное положение вида в исследованной выборке, но сами по себе не позволяют установить механизм накопления селена.

При принятии решений о возможном повышении содержания селена в рационах (особенно для организованных коллективов) необходимо учитывать не только содержание микронутриента, но и экономическую составляющую. Орехи и орехоподобные культуры существенно различаются по своей розничной стоимости: цена за 100 г продукта на российском потребительском рынке варьирует от 33 руб. (арахис) до 400 руб. (кедровый орех). Значительный разброс розничных цен обусловлен географией производства, трудоемкостью возделывания и уборки, а также логистическими издержками при импорте. Стоимость удовлетворения суточной физиологической потребности в селене за счет того или иного продукта может различаться на порядок, что практически значимо при разработке рекомендаций по питанию и формированию продуктовых корзин.

Дополнительным ограничивающим фактором является высокая калорийность орехов и семян, обусловленная значительным содержанием липидов (40–70 % от массы сухого вещества). Порция, необходимая для покрытия расчетной потребности в селене, может вносить существенный вклад в энергетическую ценность рациона. Расчет в таблице 5 выполнен для уровня 70 мкг Se/сутки – нормы физиологической потребности взрослых мужчин старше 18 лет по МР 2.3.1.0253-218; для взрослых женщин установлено 55 мкг/сутки. Уровень 70 мкг/сутки использован как единый кон-

<sup>8</sup> МР 2.3.1.0253-21. Нормы физиологических потребностей в энергии и пищевых веществах для различных групп населения Российской Федерации: методические рекомендации (утв. Главным государственным санитарным врачом РФ 22.06.2021). URL: [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_395381/](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_395381/) (дата обращения: 27.06.2026).

Таблица 5. Расчет порции, стоимости и калорийности исследованных образцов для достижения 70 мкг Se/сутки

Table 5. Portion size, cost, and caloric content across samples for target daily intake of 70 µg of selenium

| Продукт                                                | Фактическое содержание Se, мкг/100 г | Порция для 70 мкг Se, г | Цена 100 г, руб. | Стоимость расчетной порции, руб. | Ккал/100 г | Ккал в порции | % от 2000 ккал |
|--------------------------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------|------------------|----------------------------------|------------|---------------|----------------|
| Кокосовая стружка ( <i>Cocos nucifera</i> L.)          | 19,48                                | 359,3                   | 85               | 305,4                            | 354        | 1272          | 63,6           |
| Орех грецкий ( <i>Juglans regia</i> L.)                | 12,56                                | 557,3                   | 140              | 780,3                            | 654        | 3645          | 182,2          |
| Семена подсолнечника ( <i>Helianthus annuus</i> L.)    | 49,20                                | 142,3                   | 48               | 68,3                             | 601        | 855           | 42,8           |
| Фисташки ( <i>Pistacia vera</i> L.)                    | 8,60                                 | 814,0                   | 180              | 1465,1                           | 562        | 4574          | 228,7          |
| Фундук ( <i>Corylus avellana</i> L.)                   | 5,81                                 | 1204,8                  | 150              | 1807,2                           | 628        | 7566          | 378,3          |
| Арахис ( <i>Arachis hypogaea</i> L.)                   | 7,43                                 | 942,1                   | 33               | 310,9                            | 552        | 5201          | 260,0          |
| Кедровый орех ( <i>Pinus sibirica</i> Du Tour)         | Ниже предела обнаружения             | –                       | 400              | –                                | 673        | –             | –              |
| Кешью ( <i>Anacardium occidentale</i> L.)              | 21,12                                | 331,4                   | 265              | 878,3                            | 553        | 1833          | 91,6           |
| Кунжут ( <i>Sesamum indicum</i> L.)                    | 43,54                                | 160,8                   | 91               | 146,3                            | 565        | 908           | 45,4           |
| Миндаль ( <i>Prunus dulcis</i> (Mill.) D. A. Webb)     | 3,86                                 | 1813,5                  | 250              | 4533,7                           | 575        | 10427         | 521,4          |
| Пекан ( <i>Carya illinoensis</i> (Wangenh.) K. Koch)   | 6,85                                 | 1021,9                  | 290              | 2963,5                           | 691        | 7061          | 353,1          |
| Семена льна пищевые ( <i>Linum usitatissimum</i> L.)   | 24,87                                | 281,5                   | 37               | 104,1                            | 534        | 1503          | 75,2           |
| Семена тыквы ( <i>Cucurbita pepo</i> L.)               | 7,81                                 | 896,3                   | 140              | 1254,8                           | 556        | 4983          | 249,2          |
| Бразильский орех ( <i>Bertholletia excelsa</i> Bonpl.) | 1141,26                              | 6,1                     | 400              | 24,5                             | 659        | 40            | 2,0            |

сервативный сценарий для сопоставления продуктов. Энергетическую ценность рациона условно приняли равной 2000 ккал. Калорийность продуктов принята по справочным данным таблиц химического состава пищевых продуктов. Розничные цены зафиксированы в период исследования (2025–2026 гг.).

Для модельной оценки принята условная порция орехов и семян 20 г/сутки. Выбранная величина соответствует диапазону 15–30 г/сутки, приведенному в научном обосновании. Dutch Dietary Guidelines 2025 для совокупного потребления орехов, арахиса и семян<sup>9</sup>, и используется как унифицированная рас-

четная порция, а не как установленная в Российской Федерации физиологическая норма. В порции 20 г вклад количественно определенных продуктов в достижение принятого расчетного уровня 70 мкг Se/сутки составляет от 1,1 % для миндаля до 14,1 % для семян подсолнечника; для кунжута – 12,4 %, для семян льна – 7,1 %. Для кедрового ореха верхняя оценка, рассчитанная по пределу обнаружения, составляет менее 0,2 %. Средняя порция бразильского ореха 20 г содержит 228,3 мкг Se (326,1 % от принятого расчетного уровня), а для двух отдельных образцов диапазон составляет 174,6–281,9 мкг (249,4–402,7 % от принятого расчетного уровня). При отдельном расчете количества продукта, обеспечивающего 70 мкг Se, наименьшая стоимость получена для семян подсолнечника (68,3 руб.), семян льна (104,1 руб.) и кунжута (146,3 руб.); наибольшая стоимость – для мин-

<sup>9</sup> Health Council of the Netherlands. Nuts and seeds and chronic diseases: Background document to Dutch dietary guidelines: dietary protein sources and dietary patterns 2025. URL: <https://www.health-council.nl/documents/2025/12/04/nuts-and-seeds-and-chronic-diseases> (дата обращения: 27.06.2026).

даля (4533,7 руб.), пекана (2963,5 руб.) и фундука (1807,2 руб.). Для бразильского ореха расчетная порция составляет 6,1 г стоимостью 24,5 руб., однако из-за высокой вариабельности содержания Se такой расчет следует рассматривать как ориентировочный.

При получении 70 мкг Se наименьший расчетный энергетический вклад среди продуктов без бразильского ореха дают семена подсолнечника (855 ккал; 42,8 % от 2000 ккал), кунжут (908 ккал; 45,4%) и семена льна (1503 ккал; 75,2 %). Наибольший вклад рассчитан для миндаля (10 427 ккал; 521,4 %), фундука (7566 ккал; 378,3 %) и пекана (7061 ккал; 353,1 %). Эти значения показывают, что большинство исследованных продуктов нецелесообразно рассматривать как единственный источник закрытия суточной потребности в Se.

Среди продуктов без бразильского ореха наиболее благоприятное сочетание расчетной стоимости и энергетической нагрузки при получении 70 мкг Se характерно для семян подсолнечника, кунжута и семян льна. Для бразильского ореха расчетная порция 6,1 г соответствует примерно 40 ккал (2,0 % от рациона) и стоимости 24,5 руб., однако практическая интерпретация ограничена выраженной вариабельностью содержания Se между образцами. Для арахиса расчетная порция составляет 942,1 г; 5201 ккал (260,0 %) и 310,9 руб., что исключает его использование как единственного источника принятого расчетного уровня Se.

### Выводы

В исследовании методом инверсионной вольтамперометрии определено содержание Se в 28 образцах, представлявших 14 видов орехов и семян, реализуемых в розничной торговле (Кемерово, Россия)

В 24-х количественно определенных образцах без бразильского и кедрового орехов среднее содержание Se составило 17,59 мкг/100 г при среднем справочном значении 17,03 мкг/100 г. При этом совпадение средних не отражало выраженных различий для отдельных видов. В кедровом орехе содержание Se было ниже предела обнаружения.

Наибольшие отклонения средних значений от справочных установлены для фисташек (+132,4 %), пекана (+80,3 %), фундука (+45,1 %), кунжута (+26,6 %) и грецкого ореха (–26,1 %). Эти результаты характеризуют исследованную выборку и не могут быть экстраполированы на всю продукцию соответствующего происхождения.

Разведочный анализ справочных значений белков и жиров не выявил статистически значимой связи с фактическим содержанием Se. Ввиду использования вторичных данных и малого объема выборки результат не подтверждает отсутствие биохимических взаимосвязей и требует проверки с прямым определением макронутриентов и показателей антиоксидантной активности.

Для условной порции 20 г вклад большинства количественно определенных продуктов составил 1,1–14,1 % принятого расчетного уровня 70 мкг Se/сут, тогда как средняя порция бразильского ореха обеспечивала около 326 % принятого расчетного уровня. Из-за высокой межобразцовой вариабельности расчеты для бразильского ореха следует использовать только как ориентировочные.

Ограничениями работы являются исследование двух образцов каждого вида, формирование каждого образца из двух упаковок одной товарной партии, отсутствие оценки межпартийной вариабельности, использование справочных значений белков и жиров и невозможность количественного определения Se в кедровом орехе примененным методом.

Полученные данные обосновывают необходимость расширенного мониторинга содержания Se в орехах и семенах с включением нескольких товарных партий, прямым определением макронутриентного состава и применением более чувствительных методов для образцов с низким содержанием элемента.

### Критерии авторства

Авторы в равной степени участвовали в написании рукописи.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### Contribution

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

### 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. Rayman M. P. Selenium and human health. *Lancet*. 2012;379(9822):1256–1268. [https://doi.org/10.1016/s0140-6736\(11\)61452-9](https://doi.org/10.1016/s0140-6736(11)61452-9)
2. Kieliszek M, Błażej S. Selenium: Significance, and outlook for supplementation. *Nutrition*. 2013;29(5):713–718. <https://doi.org/10.1016/j.nut.2012.11.012>
3. Варламова Е. Г., Мальцева В. Н. Уникальность природы микроэлемента селена и его ключевые функции. *Биофизика*. 2019. Т. 64. № 4. С. 646–660. [Varlamova EG, Maltseva VN. The uniqueness of the nature of the trace element selenium and its key functions. *Biophysics*. 2019;64(4):646–660. (In Russ.)] <https://doi.org/10.1134/S0006302919040021>

4. Alamir SG, Al-Harrasi A, Ibrahim AE. The interplay of selenium and human health. *Recent Advances in Thyroid Disorders*. 2025;1–26. <https://doi.org/10.5772/intechopen.1009672>
5. Rayman MP. Selenium intake, status, and health: a complex relationship. *Hormones*. 2020;19(1):9–14. <https://doi.org/10.1007/s42000-019-00125-5>
6. Rayman MP. The argument for increasing selenium intake. *Proceedings of the Nutrition Society*. 2002;61(2):203–215. <https://doi.org/10.1079/PNS2002153>
7. Kieliszek M, Błażej S. Current knowledge on the importance of selenium in food for living organisms: A Review. *Molecules*. 2016;21(5):609. <https://doi.org/10.3390/molecules21050609>
8. Kieliszek M, Bano I, Zare H. A Comprehensive review on selenium and its effects on human health and distribution in middle eastern countries. *Biological Trace Element Research*. 2022;200(3):971–987. <https://doi.org/10.1007/s12011-021-02716-z>
9. Combs GF Jr. Selenium in global food systems. *British Journal of Nutrition*. 2001;85(5):517–547. <https://doi.org/10.1079/BJN2000280>
10. Navarro-Alarcon M, Cabrera-Vique C. Selenium in food and the human body: A review. *Science of the Total Environment*. 2008;400(1–3):115–141. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.06.024>
11. Stoffaneller R, Morse NL. A review of dietary selenium intake and selenium status in Europe and the middle east. *Nutrients*. 2015;7(3):1494–1537. <https://doi.org/10.3390/nu7031494>
12. Rayman MP. Food-chain selenium and human health: Emphasis on intake. *British Journal of Nutrition*. 2008;100(2):254–268. <https://doi.org/10.1017/S0007114508939830>
13. Ibrahim SAZ, Kerkadi A, Agouni A. Selenium and health: An update on the situation in the middle east and North Africa. *Nutrients*. 2019;11(7):1457. <https://doi.org/10.3390/nu11071457>
14. Бубнова Н. В., Тимофеева Н. Ю., Кострова О. Ю., Стручко Г. Ю., Котёлкина А. А. и др. Биологическая роль селена (обзор литературы). *Acta Medica Eurasica*. 2023. № 2. С. 114–123. [Bubnova NV, Timofeeva NYu, Kostrova OYu, Struchko GYu, Kotelkina AA, *et al*. Biological role of selenium (literature review). *Acta Medica Eurasica*. 2023;(2):114–123. (In Russ.)] <https://doi.org/10.47026/2413-4864-2023-2-114-123>
15. Sioen I, Boon PE, Huybrechts I, De Neve M, Amiano P, *et al*. Long-term dietary exposure to selenium in young children living in different European countries. *EFSA Supporting Publications*. 2010;7(5):EN-56. <https://doi.org/10.2903/sp.efsa.2010.EN-56>
16. Lymbury R, Tinggi U, Griffiths L, Rosenfeldt F, Perkins AV. Selenium status of the Australian population: Effect of age, gender and cardiovascular disease. *Biological Trace Element Research*. 2008;126(1–3):1–10. <https://doi.org/10.1007/s12011-008-8208-6>
17. Сапарклычева С. Е., Чулкова В. В. Растения, обладающие способностью концентрировать селен. *Вестник биотехнологии*. 2020. № 2. С. 14. [Saparklycheva SE, Chulkova VV. Plants with the ability to concentrate selenium. *Bulletin of Biotechnology*. 2020;(2):14. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/BQAAAI>
18. Hu W, Zhao C, Hu H, Yin S. Food sources of selenium and its relationship with chronic diseases. *Nutrients*. 2021;13(5):1739. <https://doi.org/10.3390/nu13051739>
19. Filippini T, Michalke B, Wise LA, Malagoli C, Malavolti M, *et al*. Diet composition and serum levels of selenium species: A cross-sectional study. *Food and Chemical Toxicology*. 2018;115:482–490. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2018.03.048>
20. Kannamkumarath SS, Wrobel K, Wrobel K, Vonderheide A, Caruso JA. HPLC-ICP-MS determination of selenium distribution and speciation in different types of nut. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*. 2002;373:454–460. <https://doi.org/10.1007/s00216-002-1354-3>
21. Rodushkin I, Engström E, Sörlin D, Baxter D. Levels of inorganic constituents in raw nuts and seeds on the Swedish market. *Science of the Total Environment*. 2008;392:290–304. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2007.11.024>
22. Журавлев А. В., Гиро Т. М., Куликовский А. В., Андреева С. В. Методология определения органического селена в форме селенометионина в пищевой продукции. *Достижения науки и техники АПК*. 2023. Т. 37. № 12. С. 82–86. [Zhuravlev AV, Giro TM, Kulikovskiy AV, Andreeva SV. Methodology for determining organic selenium in the form of selenomethionine in food products. *Achievements of Science and Technology of the Agro-Industrial Complex*. 2023;37(12):82–86. (In Russ.)] [https://doi.org/10.53859/02352451\\_2023\\_37\\_12\\_82](https://doi.org/10.53859/02352451_2023_37_12_82)
23. Elsom R, Sanderson P, Hesketh JE, Jackson MJ, Fairweather-Tait SJ, *et al*. Functional markers of selenium status: UK food standards agency workshop report. *British Journal of Nutrition*. 2006;96(5):980–984. <https://doi.org/10.1017/BJN20061893>
24. Filichkina OG, Zakharova EA, Slepchenko GB. Determination of selenium in foodstuffs by cathodic stripping voltammetry at a mercury-graphite electrode. *Journal of Analytical Chemistry*. 2004;59(5):481–486. <https://doi.org/10.1023/B:JANC.0000026242.68261.13>
25. Дерябина В. И., Скворцова Л. Н., Захарова Э. А., Слеченко Г. Б. Вольтамперометрический контроль содержания селена и его форм в растениях и пищевых добавках с использованием экстракции и ионного обмена. *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2006. Т. 72. № 11. С. 7–10. [Deryabina VI, Skvortsova LN, Zakharova EA, Slepchenko GB. Voltammetric control of selenium content and its forms in plants and food additives using extraction and ion exchange. *Factory Laboratory. Materials Diagnostics*. 2006;72(11):7–10. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/HZZAWZ>



26. Slepchenko GB, Moiseeva ES, Dorozhko EV, Ostapenko MS, Auelbekova A, *et al.* An electrochemical sensor for detecting selenium in biological fluids on an arenediazonium tosylate-modified metal electrode. *Analytical Methods*. 2021;13(13):1584–1590. <https://doi.org/10.1039/D1AY00156F>
27. Schomburg L. Dietary selenium and human health. *Nutrients*. 2017;9(1):22. <https://doi.org/10.3390/nu9010022>
28. Варламова Е. Г. Микроэлемент селен: уникальные свойства, встречаемость в природе, ключевые функции селеносодержащих соединений, роль в здоровье. М.: Русайнс, 2024. 88 с. [Varlamova EG. The trace element selenium: unique properties, occurrence in nature, key functions of selenium-containing compounds, role in health. Moscow: Rusains; 2024. 88 p. (In Russ.)]
29. Janghorbani M, Xia Y, Ha P, Whanger PD, Butler JA, *et al.* Effect of dietary selenium restriction on selected parameters of selenium status in men with high life-long intake. *Journal of Nutritional Biochemistry*. 1999;10(10):564–572. [https://doi.org/10.1016/S0955-2863\(99\)00039-X](https://doi.org/10.1016/S0955-2863(99)00039-X)

**Дополнительная информация об авторах / Additional information about the authors**

Давыденко Наталия Ивановна / Nataliia I. Davydenko ORCID 0000-0003-2479-8750; eLIBRARY SPIN 7513-1585  
Зирка Анна Юрьевна / Anna Yu. Zirka ORCID 0000-0003-3441-4351; eLIBRARY SPIN 2081-7995  
Мирный Даниил Дмитриевич / Daniil D. Mirnyj ORCID 0009-0002-5105-2938; eLIBRARY SPIN 5802-8177

<https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-3-2658>  
<https://elibrary.ru/JWZYDU>

Оригинальная статья  
<https://fppt.ru>

## Использование отходов зерноводства для производства литий-ионных аккумуляторов



Н. А. Муравьева<sup>1,\*</sup>, Н. Ю. Наветный<sup>1</sup>, Д. А. Полыньёв<sup>1</sup>,  
Е. В. Примаченко<sup>1</sup>, Я. А. Масютин<sup>1</sup>, М. Ирфан<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Балтийский федеральный университет им. И. Кант<sup>ROR</sup>, Калининград, Россия

<sup>2</sup> Университет Саргодха<sup>ROR</sup>, Пенджаб, Пакистан

Поступила в редакцию: 17.06.2026

Принята после рецензирования: 14.08.2026

Принята к публикации: 01.09.2026

\*e-mail: [natahlie98@gmail.com](mailto:natahlie98@gmail.com)

© Н. А. Муравьева, Н. Ю. Наветный, Д. А. Полыньёв,  
Е. В. Примаченко, Я. А. Масютин, М. Ирфан, 2026



### Аннотация.

Масштабирование производства зерновых культур в Калининградской области (Россия) сопровождается образованием более 200 тыс. т соломы в год, утилизация которой наносит экологический ущерб. Цель исследования – изучить возможность и целесообразность использования биоугля из соломы для производства литий-ионных аккумуляторов, а также выбрать наиболее перспективный метод и технологические параметры его получения.

Объектом исследования служила солома озимой пшеницы, отобранная в хозяйствах Калининградской области. Сырье подвергали гидротермальной карбонизации с варьированием температуры (200–260 °С), времени (1–3 ч) и гидромодуля (1:6, 1:12, 1:18). Оптимальные режимы гидротермальной карбонизации составили: 260 °С, 60 мин, гидромодуль 1:12. Полученный биоуголь дополнительно подвергали многостадийному пиролизу при температуре до 800 °С. Характеристику продуктов проводили методами элементного анализа, гравиметрии, лазерной дифракции, а также электрохимическим тестированием в составе лабораторных литий-ионных аккумуляторов дискового типа в сравнении с коммерческим графитом AGP-2.

Элементный состав исходной соломы показал высокое содержание углерода (44,2 %), что подтверждает ее пригодность для термохимической конверсии. После гидротермальной карбонизации при оптимальных условиях массовая доля углерода возросла до 61,3 %, а после пиролиза – до 80–95 %. Средний размер частиц биоугля ( $D_{50} = 26,2$  мкм) соответствует отраслевым стандартам для анодных материалов. Электрохимические испытания продемонстрировали, что опытный образец обладает более высокой начальной удельной емкостью по сравнению с коммерческим графитом, однако характеризуется пониженной стабильностью при циклировании, что обусловлено формированием твердого защитного межфазного слоя и аморфной структурой материала.

Экспериментально подтверждена возможность использования соломы озимой пшеницы в качестве прекурсора для синтеза биоугля, пригодного для изготовления анодов литий-ионных аккумуляторов. Данный подход снижает потребление невозобновляемых ресурсов и углеродный след агропромышленного комплекса. Дальнейшие исследования должны быть направлены на повышение стабильности электрохимических характеристик.

**Ключевые слова.** Переработка отходов, солома пшеничная, биоуголь, гидротермальная карбонизация, литий-ионные батареи

**Финансирование.** Работа выполнена в рамках реализации проекта «Изучение научно-технологических основ секвестрации парниковых газов за счет производства и применения биоугля из отходов сельского хозяйства и бросовой биомассы высокоинвазивных растений», FZWM-2026-0004 (Министерство науки и высшего образования Российской Федерации).

**Для цитирования:** Муравьева Н. А., Наветный Н. Ю., Полыньёв Д. А., Примаченко Е. В., Масютин Я. А. и др. Использование отходов зерноводства для производства литий-ионных аккумуляторов. Техника и технология пищевых производств. 2026. Т. 56. № 3. С. 639–653. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-3-2658>

## Grain Industry Waste in Lithium-Ion Battery Production



Natalia A. Muravieva<sup>1,\*</sup>, Nikita Yu. Navetnykh<sup>1</sup>,  
Daniil A. Polynev<sup>1</sup>, Elisaveta V. Primachenko<sup>1</sup>,  
Yakov A. Masyutin<sup>1</sup>, Muhammad Irfan<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Baltic Federal University<sup>ROR</sup>, Kaliningrad, Russia

<sup>2</sup> University of Sargodha<sup>ROR</sup>, Punjab, Pakistan

Received: 17.06.2026  
Revised: 14.08.2026  
Accepted: 01.09.2026

\*e-mail: [natahlie98@gmail.com](mailto:natahlie98@gmail.com)  
© N.A. Muravieva, N.Yu. Navetnykh, D.A. Polynev, E.V. Primachenko,  
Y.A. Masyutin, M. Irfan, 2026



### Abstract.

The Kaliningrad Region generates over 200,000 tons of straw annually, and its disposal often causes environmental degradation. However, straw-derived biochar can be utilized in the production of lithium-ion batteries. This article describes the most effective processing methods and structural parameters for this application.

The study utilized winter wheat straw collected from farms in the Kaliningrad Region. The raw material was subjected to hydrothermal carbonization with varying temperatures (200–260°C), residence times (1–3 h), and water-to-biomass ratios (1:6, 1:12, 1:18). The optimal hydrothermal carbonization conditions proved to be 260°C for 60 min with a water ratio of 1:12. The resulting biochar was then subjected to multi-stage pyrolysis at temperatures up to 800°C. The products were characterized using elemental analysis, gravimetry, laser diffraction, and electrochemical testing in laboratory coin-cell lithium-ion batteries, which were compared against commercial AGP-2 graphite.

The elemental composition of the precursor straw revealed a high carbon content (44.2%), confirming its suitability for thermochemical conversion. The hydrothermal carbonization under optimal conditions raised the carbon mass fraction to 61.3%, while the subsequent pyrolysis increased it to 80–95%. The average particle size of the resulting biochar ( $D_{50} = 26.2 \mu\text{m}$ ) complied with industrial standards for anode materials. The electrochemical analysis demonstrated that the prototype possessed a higher initial specific capacity than commercial graphite but lower cycling stability, which could be attributed to its amorphous structure and the formation of a solid electrolyte interphase layer.

Winter wheat straw proved to be an effective precursor for synthesizing biochar suitable for lithium-ion battery anodes. This approach reduces the consumption of non-renewable resources and lowers the carbon footprint of the agricultural sector. Further research is required to enhance the stability of its electrochemical properties.

**Keywords.** Waste recycling, wheat straw, biochar, hydrothermal carbonation, lithium-ion batteries

**Funding.** The research was carried out as part of the project implementation “Study of the scientific and technological foundations of greenhouse gas sequestration through the production and use of biochar from agricultural waste and waste biomass of highly invasive plants”, FZWM-2026-0004 (Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation).

**For citation:** Muravieva NA, Navetnykh NYu, Polynev DA, Primachenko EV, Masyutin YA, et al. Grain Industry Waste in Lithium-Ion Battery Production. Food Processing: Techniques and Technology. 2026;56(3):639–653. (In Russ.) <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-3-2658>

### Введение

Калининградская область (Россия) занимает лидирующие позиции по объему выращивания основных злаковых и масличных культур, включая пшеницу, сою и рапс<sup>1</sup>. Доминирующей зерновой культурой являются озимые сорта пшеницы, что обусловлено высокой урожайностью, повышенной устойчивостью к комплексу абиотических и биотических стрессовых факторов и технологичностью возделывания [1]. В 2023 г. посевные площади озимой пшеницы с 2013 г. увеличились

более чем в два раза: с 34,5 до 75,9 тыс. га<sup>2</sup>. С ростом урожайности пропорционально возрастают объемы образующихся растительных отходов, требующих переработки. Принимая во внимание нормативные показатели выхода соломы, составляющие для озимой пшеницы в среднем 30–40 ц с гектара [2], расчетный совокупный объем образующейся соломенной биомассы только за 2023 г. составил более 200 тыс. т. Указанная проблема является актуальной не только

<sup>1</sup> Растениеводство. URL: <https://mcx.gov39.ru/rastenievodstvo/> (дата обращения 29.12.2025).

<sup>2</sup> Сельское хозяйство. Зерновые и зернобобовые. URL: [https://39.rosstat.gov.ru/statistical\\_news/document/225459](https://39.rosstat.gov.ru/statistical_news/document/225459) (дата обращения 05.05.2025).

для Калининградской области, но и для территории Российской Федерации в целом. Так, в России в 2025 г. собрано свыше 93 млн т пшеницы, что по расчетам привело к образованию до 139,5 млн т соломы. Расчетный мировой объем образования соломы с учетом ежегодного производства 841,8 млн т пшеницы составляет около 1 млрд т<sup>3</sup>. Анализ приведенных количественных данных подтверждает не только наличие, но и объективную остроту вопроса рециклинга соломы для предприятий агропромышленного комплекса.

Наиболее распространенным способом утилизации соломы остается ее сжигание на полях, что ведет к загрязнению атмосферного воздуха оксидами углерода и азота, сажей и полициклическими ароматическими углеводородами [3]. При сжигании 1 т соломы в атмосферу выделяется около 350–500 кг углекислого газа, до 20 кг угарного газа, от 4 до 7 кг оксидов азота, 1–3 кг твердых частиц (зола и сажи), а также опасных канцерогенов (бензапирена и диоксина). Регламентированная доля сжигаемой соломы от совокупного годового объема ее образования не превышает 15 %, что в количественном выражении составляет до 30 тыс. т по Калининградской области, до 21 млн т – по Российской Федерации и до 150 млн т – в мировом масштабе. В рамках легального сжигания суммарные валовые выбросы загрязняющих веществ достигают  $75 \times 10^9$  кг в год, что представляет собой существенный фактор загрязнения атмосферного воздуха. Однако фактическая антропогенная эмиссия оказывается выше из-за систематического превышения разрешенных объемов отдельными сельхозпроизводителями.

В рамках агротехнических практик от 40 до 45 % соломы подвергается заделке в почвенный горизонт с целью восстановления баланса гумуса и повышения содержания органического вещества [4]. Согласно литературным данным, возможны фитосанитарные риски, связанные с деструкцией растительных остатков живыми организмами. В процессе деструкции соломы происходит интенсивная фиксация минерального азота живыми микроорганизмами почвы, в результате чего культивируемые растения испытывают азотное голодание. Дополнительным фактором выступает возникновение и развитие фитопатогенных грибов, провоцирующих массовые вспышки заболеваний посевных культур [4].

Таким образом, существующие способы уничтожения соломенных отходов ведут к многотоннажным выбросам оксидов углерода и азота в атмосферный воздух, а попытки их использования в качестве удобрений сопровождаются ухудшением свойств почвы. На сегодняшний день существует ряд направлений рационального использования соломы, в т. ч. получение продуктов тонкого органического синтеза на основе лигноцеллюлозной биомассы [5], применение

в качестве дисперсного армирующего компонента композитов [6] и синтез биodeградируемых пластиков [7]. Однако данные методы позволяют переработать не более 5 % от общего объема отходов, что сохраняет актуальность поиска новых решений и технологий в данной области. Перспективным направлением представляется использование соломы в качестве сырья для производства биоуглей, отличающихся высокой пористостью и сорбционной способностью. Подобные биоугли уже задействованы в очистке сточных вод и ремедиации загрязненных почв [8]. Наряду с этим инновационным направлением применения биоугля из соломы, обусловленным его высокими емкостными характеристиками, следует признать производство аккумуляторов энергии.

Одним из наиболее распространенных типов аккумуляторов по числу выпускаемых единиц выступают литий-ионные накопители тока. При этом специалисты отмечают ежегодное увеличение объемов производства литий-ионных аккумуляторов (ЛИА) в среднем на 20 % в денежном эквиваленте [9], что связано, в первую очередь, с ростом выпуска электромобилей. Согласно прогнозам, к 2030 г. рост рынка по мощности выпускаемых ЛИА составит 400 % – с 700 (2022 г.) до 3000 ГВт·ч [10].

Традиционно в структуре ЛИА в качестве анода применяются углеродные материалы (графит, нанотрубки, нановолокна), способные обратимо интеркалировать ионы лития при зарядке [11]. Наибольшее распространение получил графит, производимый из невозобновляемого ископаемого сырья (графитовых руд, нефтяного или каменноугольного кокса) [12, 13]. Процесс получения такого графита сопряжен с выделением парниковых газов и задействованием токсичных реагентов, в т. ч. плавиковой кислоты [14]. Использование графитовых анодов характеризуется высоким углеродным следом, составляющим от 2,4 до 4,4 кг CO<sub>2</sub>-эквивалента на единицу производимой продукции [15].

Таким образом, обостряются две взаимосвязанные экологические проблемы, требующие безотлагательного решения. Первая связана с избыточным накоплением отходов агропромышленного комплекса (соломы), утилизация которых традиционными методами приводит к существенному воздействию на окружающую среду. Вторая проблема обусловлена вовлечением графита в динамично развивающемся производстве ЛИА, добыча и обогащение которого не только истощают минерально-сырьевую базу, но и сопровождаются значительной эмиссией загрязняющих веществ в атмосферный воздух. Применение биоугля из соломы для производства анодного материала ЛИА помимо утилизации отходов обеспечивает включение более дешевого и возобновляемого сырья взамен традиционных углеродных материалов [16].

Для получения биоугля из растительной биомассы традиционно используют пиролиз, который обеспе-

<sup>3</sup> Wheat production. URL: <https://www.fas.usda.gov/data/production/0410000> (дата обращения 18.03.2026).



чивает формирование биоугля со стабильной высокопористой структурой, однако данный метод характеризуется значительной энергоемкостью и не подходит для переработки влажных отходов [17]. Альтернативный метод, протекающий при более низких температурах, – гидротермальная карбонизация. Данный метод применим для высоковлажной биомассы, но приводит к формированию угольного продукта с меньшим содержанием углерода и пониженной удельной площадью поверхности, что может привести к необходимости дополнительной обработки полученного биоугля [18]. При этом конечные физико-механические характеристики и элементный состав биоугля существенно варьируются в зависимости от типа исходного сырья и режимов проведения процесса, что не позволяет, опираясь только на теоретические данные, прогнозировать эффективность угля в химических источниках тока. Цель исследования – изучить возможность и целесообразность использования биоугля из соломы для производства ЛИА, а также выбрать наиболее перспективный метод и технологические параметры его получения.

#### Объекты и методы исследования

Объект исследования – солома озимой пшеницы, отобранная в хозяйствах Калининградской области (Гурьевский район, Россия). С микроструктурной позиции данный материал образован полыми цилиндрическими элементами, диаметр внутреннего канала которых существенно превышает толщину стенок. Стенки стебля пронизаны системой продольных капилляров, имеющих в поперечном сечении форму, приближенную к пчелиным сотам, и характеризующихся гексагональной, овальной либо неопределенной конфигурацией; капиллярные структуры располагаются без строгой упорядоченности [19]. Химический состав соломы представлен в таблице 1.

Содержание воды и золы определяли гравиметрически; лигнина – методом кислотного гидролиза в соответствии с ГОСТ 26177-84 «Корма, комбикорма. Метод определения лигнина»; целлюлозу – по ГОСТ 6840-78 «Целлюлоза. Метод определения содержания альфа-целлюлозы». Элементный состав устанавливали с помощью анализатора Vario EL cube (Elementar GmbH, Германия), работающего по принципу каталитического сжигания пробы с последующим адсорбционным разделением газов и их детектированием катарометрическим датчиком.

Выявленное высокое содержание углерода в соломе озимой ( $44,20 \pm 0,33$  %) подтверждает гипотезу о перспективности использования данного агропромышленного отхода в качестве прекурсора для получения биоугля. Развитый высокоуглеродистый полимерный матрикс, представленный целлюлозно-лигниновым комплексом, обеспечивает структурную устойчивость биомассы в ходе термохимических превращений. Повышенная исходная концентрация углерода способствует

Таблица 1. Химический состав соломы пшеничной

Table 1. Chemical composition of wheat straw

| Показатель, % | Значение         |
|---------------|------------------|
| Вода          | $5,60 \pm 0,10$  |
| Зола          | $7,76 \pm 0,10$  |
| Лигнин        | $14,40 \pm 0,30$ |
| Целлюлоза     | $22,50 \pm 0,70$ |
| C             | $44,20 \pm 0,33$ |
| H             | $6,11 \pm 0,070$ |
| N             | $0,79 \pm 0,07$  |
| S             | $0,02 \pm 0,01$  |
| O             | $41,86 \pm 0,69$ |

уменьшению интенсивности массопереноса и минимизации эмиссии углеродсодержащих летучих соединений на стадиях гидротермальной карбонизации и пиролиза, что в совокупности благоприятствует формированию плотной электропроводящей углеродной архитектуры конечного продукта.

Для термохимической конверсии исходного лигно-целлюлозного сырья в углеродный материал выбран метод гидротермальной карбонизации, признанный наиболее технологически рациональным и экологически безопасным при переработке низкокалорийных и высоковлажных отходов. Сущность данного процесса базируется на последовательности реакций деструкции, гидролиза, дегидратации, декарбоксилирования, а также последующей гетерогенной полимеризации и конденсации промежуточных мономеров органического вещества. Главной технологической особенностью метода является его реализация в водной среде, находящейся в субкритическом состоянии под давлением. В этих условиях вода одновременно выполняет функции экологически чистого растворителя и химического реагента. Именно в водной среде происходят кислотно-основные взаимодействия процесса. Высокая диэлектрическая проницаемость и повышенное ионное произведение субкритической воды обеспечивают эффективную деструкцию гемицеллюлозного и аморфного целлюлозного комплексов соломы озимой пшеницы. Это позволяет направленно синтезировать твердый биоуголь из жидкой фазы, минимизируя прямую эмиссию летучих органических соединений в атмосферу [20].

Солому предварительно высушивали в сушильном шкафу при температуре  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  в течение 3–4 ч, затем измельчали на лабораторной ножевой дробилке. Для получения фракции размером 2 мм частицы просеивали через лабораторное сито с диаметром ячеек 2 мм. Подготовленные частицы смешивали с дистиллированной водой в соотношениях 1:6; 1:12 и 1:18 до объема 300 мл. Смесь помещали в реактор-автоклав периодического действия, оборудованный магнитной мешалкой, термпарой для контроля температуры и системой автоматического программирования максимальной температуры нагрева (рис. 1). Реактор выполнен из нержавеющей

веющей стали и рассчитан на давление до 10 МПа, температуру до 380 °С и объем 310 мл. Начальная температура внутри автоклава составляла 18–20 °С. Температура и время нагрева варьировались от 200 до 260 °С (табл. 2). По окончании нагревания реактор помещали на холодную водяную баню с непрерывной подачей холодной воды для охлаждения до 25 °С. После охлаждения газовую фазу отводили в вытяжной шкаф. Смесь фильтровали с помощью воронки Бюхнера, твердый остаток (биоуголь) высушивали при 105 °С в течение 12 ч.

На втором этапе биоуголь подвергали многоступенчатому пиролизу на лабораторной установке (рис. 2), включающей трубчатую печь пиролиза с контролем температуры и возможностью программирования температурных режимов, систему ввода инертного газа (азота) и систему отведения газообразных продуктов.

Установка оборудована системой воздушного охлаждения внешнего корпуса для предотвращения перегрева деталей. Образцы размещали в керамических бюксах внутри кварцевой трубки диаметром 30 мм.

Биоуголь подвергали карбонизации в атмосфере азота объемом 250 мл. На первой стадии температуру повышали в течение 60 мин до 300 °С и выдерживали в течение 30 мин. На второй стадии температуру увеличивали до 600 °С за 60 мин и выдерживали образец в течение 60 мин. Затем температуру доводили до 700 °С и выдерживали 90 мин. После нагрева температуру снижали сначала до 300 °С в течение 60 мин, затем до 200 °С. В результате получен биоуголь, который в дальнейшем использовали при формировании электродов литий-ионных аккумуляторов (ЛИА).

Характеристики полученных биоуглей оценивали общепринятыми физико-химическими методами. Выход продукта определяли по соотношению исходной массы соломы и массы полученного биоугля. Зольность выявляли прокаливанием навески в течение 4–5 ч при температуре 525 °С. Элементный анализ выполняли с использованием Vario EL Cube (Elementar, Германия) в режиме CHNS, принцип действия которого основан на измерении хроматографических пиков  $N_2$ ,  $CO_2$ ,  $H_2O$  и  $SO_2$ . Размер частиц в биоугле определяли методом лазерной

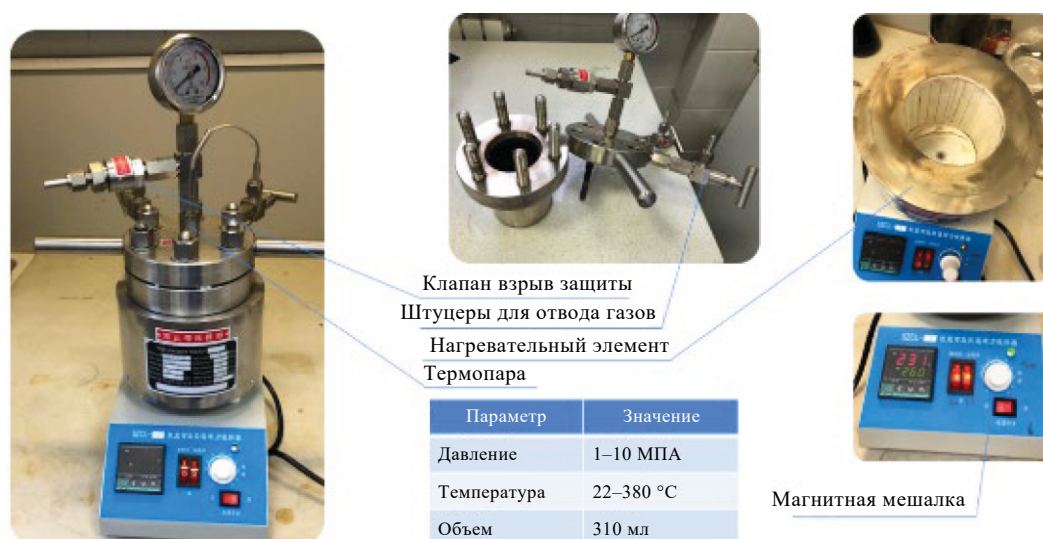


Рисунок 1. Реактор-автоклав для проведения гидротермальной карбонизации

Figure 1. Autoclave reactor for hydrothermal carbonization

Таблица 2. Варьирование температуры и времени процесса гидротермальной карбонизации

Table 2. Variation of temperature and time of the hydrothermal carbonation process

| Эксперимент | Размер частиц, мм | Температура, °С | Время, ч | Гидро модуль, биомасса:вода |
|-------------|-------------------|-----------------|----------|-----------------------------|
| 1           | 2                 | 200             | 1        | 1:12                        |
| 2           | 2                 | 200             | 2        | 1:12                        |
| 3           | 2                 | 200             | 3        | 1:12                        |
| 4           | 2                 | 230             | 1        | 1:12                        |
| 5           | 2                 | 230             | 2        | 1:12                        |
| 6           | 2                 | 230             | 3        | 1:12                        |
| 7           | 2                 | 260             | 1        | 1:12                        |
| 8           | 2                 | 260             | 2        | 1:12                        |
| 9           | 2                 | 260             | 3        | 1:12                        |

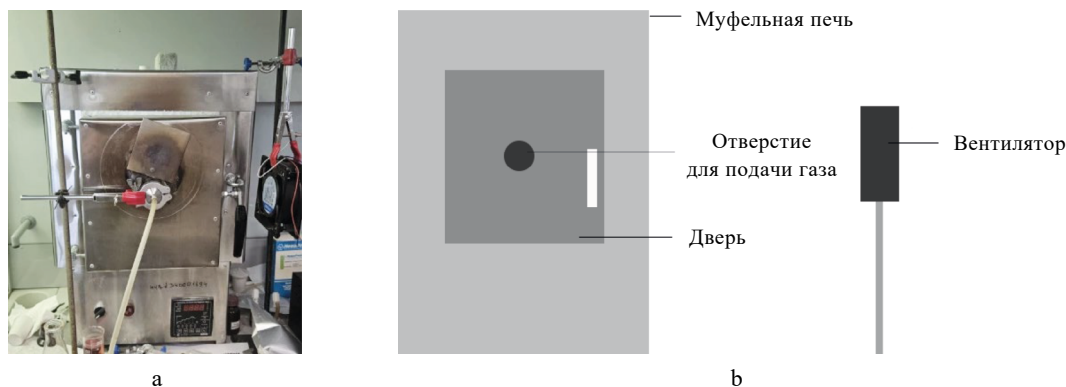


Рисунок 2. Установка для пиролиза: а – общий вид; б – основные элементы

Figure 2. Pyrolysis furnace unit: a – general view; b – main elements

дифракции на анализаторе размера частиц Wintrac 2000 с помощью запатентованной двухлучевой технологии. Для испытаний изготавливали ЛИА дискового типа с номинальным напряжением 3 В, диаметром 20 мм и толщиной 1,6 мм, в которых в качестве анода использовали биоуголь из соломы озимой пшеницы.

Известно, что в процессе эксплуатации ЛИА теряют мощность из-за уменьшения количества активных ионов лития после каждого цикла. Один цикл включает полную зарядку и разрядку аккумулятора. Для исследования ресурсных характеристик ЛИА применяют метод циклирования. В процессе циклирования на аноде оседает металлический литий, что также приводит к снижению мощности батареи. При длительном использовании происходит деградация катода с образованием инертной фазы и горючих газообразных продуктов. Все перечисленные процессы приводят к нарушению баланса емкостей электродов. В начале циклирования на поверхности электродов образуется пассивирующая пленка твердого электролита. В дальнейшем эта пленка частично разрушается, и обнаженный анод вступает в реакцию с электролитом с образованием новой пленки. Таким образом, расходуются ионы лития и электролит, вследствие чего емкость батареи снижается.

Для оценки срока службы ЛИА проводят многократные циклы заряда-разряда. В процессе испытаний фиксируют кривые заряда и разряда, на основе этих графиков в дальнейшем определяют разрядную емкость, энергию, рабочее напряжение и его стабильность. Кроме того, устанавливают взаимосвязь между электродным потенциалом и степенью заряда. По экспериментальным данным рассчитывают кулоновскую эффективность, а также строят зависимости спада емкости и снижения напряжения от числа проведенных циклов.

### Результаты и их обсуждение

На начальном этапе исследований гидротермальной карбонизации соломы озимой пшеницы проведено варьирование ключевых технологических параметров

процесса. Температурный режим реакционной среды изменяли в диапазоне от 200 до 260 °C с шагом 30 °C, а продолжительность нагревания варьировали от 1 до 3 ч с шагом 1 ч. В качестве критериев оптимизации использовали массовый выход биоугля (%) и его элементный состав (%). На рисунке 3 представлена зависимость выхода биоугля от варьируемых факторов.

При увеличении температуры и длительности обработки снижается выход готового биоугля. Это объясняется ускорением гидролитического распада гемицеллюлозы и аморфных участков целлюлозы, а также интенсификацией реакций декарбоксилирования и дегидратации. Максимальное значение выхода твердого продукта (56 %) зафиксировано при наиболее мягком режиме – температуре 200 °C и продолжительности выдержки 1 ч. Однако при этих параметрах глубина карбонизации лигноцеллюлозной матрицы остается минимальной.

Основным критерием, определяющим пригодность и электрохимическую активность синтезируемых углеродных материалов, служит их элементный состав, а именно содержание углеродной фазы. Результаты количественного элементного анализа и определения зольности твердых продуктов гидротермальной карбонизации соломы озимой пшеницы в зависимости от технологических параметров процесса представлены в таблице 3.

Анализ экспериментальных данных позволяет проследить динамику деструкции лигноцеллюлозной матрицы. Интенсификация параметров карбонизации закономерно индуцирует выраженный рост массовой доли общего углерода с одновременным снижением концентрации кислорода и водорода. При этом кинетика накопления углерода носит немонотонный характер. При температуре 260 °C увеличение изотермической выдержки с 1 до 2 ч приводит к достижению максимума карбонизации –  $63,58 \pm 0,17$  %. Дальнейшее повышение времени выдержки до 3 ч приводит к снижению углерода ( $62,53 \pm 0,22$  %), что свидетельствует о протекании вторичных деструктивных

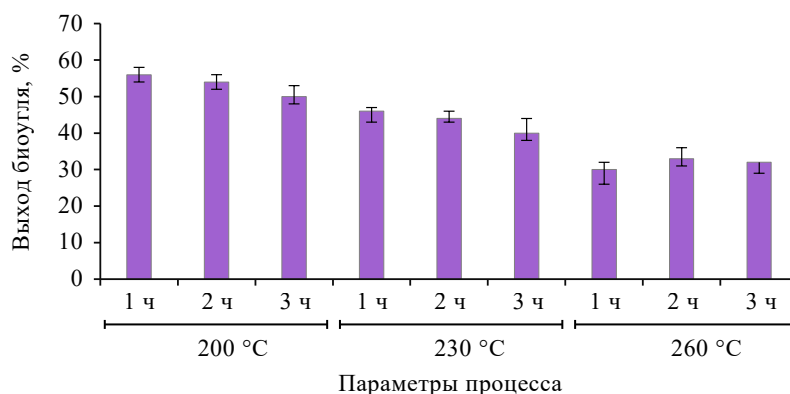


Рисунок 3. Выход биоугля, полученного методом гидротермальной карбонизации, при различных параметрах

Figure 3. Yield of biochar obtained by hydrothermal carbonation under various processing parameters

Таблица 3. Элементный состав биоугля, %, полученного при различных параметрах

Table 3. Elemental composition of biochar across different processing parameters, %

| Параметры   | C            | H             | O            | N           | S             | Зола        |
|-------------|--------------|---------------|--------------|-------------|---------------|-------------|
| 200 °C, 1 ч | 46,11 ± 0,76 | 5,794 ± 0,108 | 42,56 ± 1,30 | 0,31 ± 0,08 | 0,194 ± 0,073 | 5,03 ± 0,28 |
| 200 °C, 2 ч | 48,58 ± 0,20 | 5,782 ± 0,074 | 41,34 ± 0,55 | 0,02 ± 0,03 | 0,097 ± 0,029 | 4,18 ± 0,22 |
| 200 °C, 3 ч | 49,19 ± 0,07 | 5,842 ± 0,020 | 40,93 ± 0,35 | 0,02 ± 0,03 | 0,086 ± 0,023 | 3,93 ± 0,21 |
| 230 °C, 1 ч | 52,28 ± 0,52 | 5,806 ± 0,375 | 36,66 ± 1,39 | 0,19 ± 0,40 | 0,037 ± 0,053 | 5,03 ± 0,04 |
| 230 °C, 2 ч | 54,47 ± 1,00 | 5,560 ± 0,157 | 35,14 ± 1,56 | 0,13 ± 0,12 | 0,085 ± 0,024 | 4,62 ± 0,26 |
| 230 °C, 3 ч | 56,91 ± 0,35 | 5,568 ± 0,027 | 33,22 ± 0,45 | 0,08 ± 0,02 | 0,066 ± 0,028 | 4,16 ± 0,02 |
| 260 °C, 1 ч | 61,33 ± 0,65 | 5,143 ± 0,154 | 27,31 ± 1,06 | 0,22 ± 0,20 | 0,052 ± 0,037 | 5,95 ± 0,02 |
| 260 °C, 2 ч | 63,58 ± 0,17 | 5,377 ± 0,035 | 23,93 ± 0,55 | 0,38 ± 0,03 | 0,111 ± 0,031 | 6,62 ± 0,28 |
| 260 °C, 3 ч | 62,53 ± 0,22 | 5,176 ± 0,019 | 26,51 ± 0,45 | 0,24 ± 0,05 | 0,058 ± 0,044 | 5,49 ± 0,12 |

Таблица 4. Элементный состав биоугля, %, полученного при различных гидромодулях

Table 4. Elemental composition of coals obtained with different hydraulic modules

| Гидромодуль, солома:вода | C            | H             | O            | N           | S             | Зола        |
|--------------------------|--------------|---------------|--------------|-------------|---------------|-------------|
| 1:6                      | 55,49 ± 0,16 | 5,570 ± 0,011 | 33,47 ± 0,24 | 0,04 ± 0,02 | 0,067 ± 0,020 | 5,36 ± 0,03 |
| 1:12                     | 54,47 ± 1,00 | 5,560 ± 0,157 | 35,14 ± 1,56 | 0,13 ± 0,12 | 0,085 ± 0,024 | 4,62 ± 0,26 |
| 1:18                     | 51,84 ± 0,33 | 5,793 ± 0,013 | 39,40 ± 0,47 | 0           | 0,008 ± 0,014 | 2,96 ± 0,11 |

реакциях в образце. При ужесточении параметров также изменяется зольность продукта, что дополнительно подтверждает структурную перестройку. Для использования в анодах литий-ионных аккумуляторов (ЛИА) углеродный материал должен обладать высокой углеродистостью и энергоемкостью. С учетом требований оптимальными условиями гидротермальной карбонизации являются: температура 260 °C и продолжительность 60 мин.

При исследовании влияния различных значений гидромодуля дополнительно оценивали выход продукта (%) и элементный состав биоугля. Наибольший выход продукта (44 ± 1%) получен при гидромодуле 1:12 (солома:вода), при увеличении модуля до 1:18 и уменьшении до 1:6 зафиксировано снижение выхода биоугля до 42 ± 2 и 37 ± 5 % соответственно. При недо-

статочном количестве водной фазы в реакционной среде создаются условия, способствующие преобладанию процессов обугливания, которые, в отличие от гидротермальной карбонизации, протекают с более интенсивной деструкцией органического вещества и, как следствие, приводят к снижению выхода твердого продукта. Элементный состав полученных продуктов представлен в таблице 4.

С увеличением гидромодуля наблюдается снижение массовой доли углерода с 55,49 до 51,84 % вследствие гидролитических реакций в разбавленной реакционной среде, препятствующих полноценной конденсации углеродного скелета. Кроме того, с ростом содержания воды снижается зольность с 5,36 до 2,96 %, что объясняется более эффективным извлечением и переходом в раствор минеральных компонентов



при увеличении объема водной фазы. В условиях большего объема воды процессы диффузии и массопереноса минеральных соединений из твердой фазы в жидкую интенсифицируются, что приводит к более полному удалению зольных элементов из формирующегося биоугля. Наиболее оптимальными условиями для использования полученного биоугля в ЛИА признан гидромодуль 1:12 ввиду высокого выхода продукта и среднего содержания углерода в элементном составе. Итоговая технологическая схема изготовления биоугля для ЛИА из соломы озимой пшеницы предусматривает гидротермальную карбонизацию при условиях: гидромодуль 1:12, температура 260 °С, продолжительность 60 мин. Поскольку для электродных композиций требуется повышенное содержание углерода и развитая пористая структура, полученный биоуголь подвергали многостадийному высокотемпературному пиролизу в муфельной печи в инертной атмосфере азота по технологии, описанной выше.

После пиролитической обработки содержание углерода в конечном продукте достигало 80–95 %, что соответствует диапазону, оптимальному для использования в качестве активного компонента электродов ЛИА.

Для стабильной и качественной работы батареи необходимо наличие пространства между частицами угля в электроде, через которое беспрепятственно будут проходить ионы лития. Стандартный размер частиц (распределение  $D_{50}$ ) для графитового анода в литий-ионных батареях обычно составляет от 20 до 30 мкм. Такой диапазон обеспечивает оптимальный баланс между площадью поверхности, плотностью упаковки и скоростью интеркаляции (внедрения) ионов лития. Для оценки размера частиц в полученном биоугле из соломы использовали лазерный анализатор. На рисунке 4 представлен внешний вид частиц биоугля.

Распределение частиц по размерам представлено на рисунке 5. Анализ показал, что средний размер частиц ( $D_{50}$ ) составляет 26,235 мкм, что соответствует

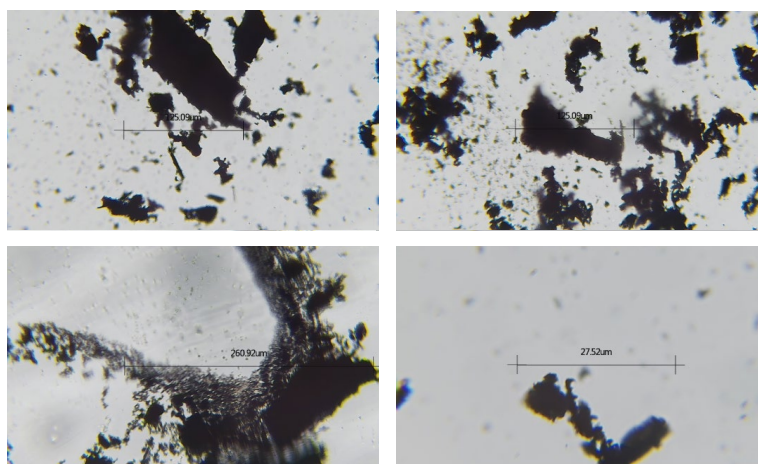


Рисунок 4. Внешний вид частиц в биоугле

Figure 4. Biochar particles

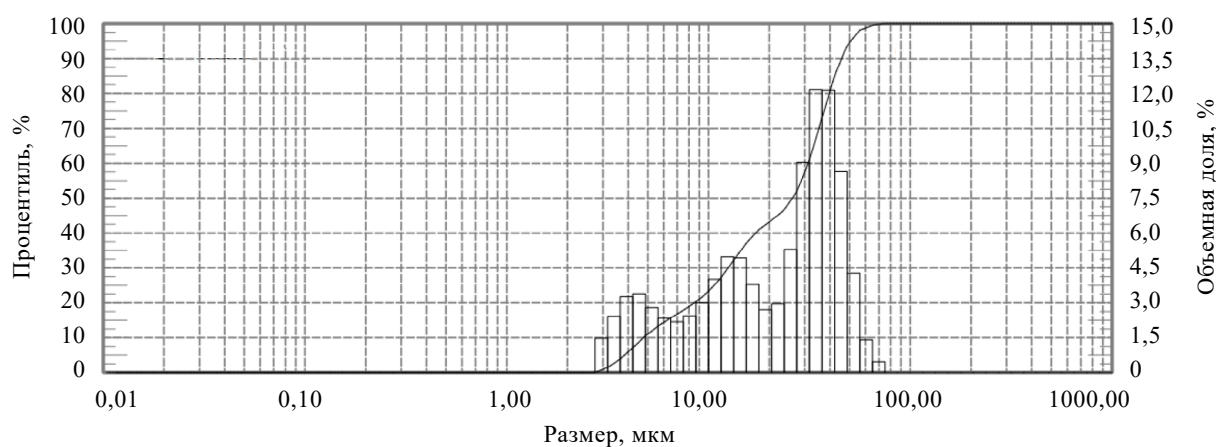


Рисунок 5. График встречаемости частиц в зависимости от их размера

Figure 5. Particle occurrence across sizes

стандартному диапазону значений частиц для работы с ЛИА (20,0–30,0 мкм). Полученный размер обеспечивает беспрепятственную диффузию ионов лития между электродами. Диапазон размеров частиц в биоугле варьируется от 4,759 до 45,342 мкм.

Сборку ЛИА осуществляли согласно схеме, представленной на рисунке 6. Первоначально подготавливали все компоненты для сборки: дно, сепаратор, спейсер, пружинку, крышку, раствор электролита, литиевый противозлектрод и анод с биоуглем. Все элементы помещали в анаэробный бокс. Процесс сборки проводили в среде аргона в перчаточном боксе серии Vilitек VBOX PRO (рис. 7). В качестве раствора электролита использовали раствор гексафторфосфата лития (LiPF<sub>6</sub>) в смеси растворителей EC:DEC = 1:1. Литиевый противозлектрод изготавливали нанесением лития на фольгу в условиях заполненности форкамеры инерт-

ным газом аргоном. Анод с биоуглем изготавливали по рецептуре, приведенной в таблице 5, с перемешиванием компонентов на магнитной мешалке в течение 8 ч. Затем смесь наносили слоем в 200 мкм на медную фольгу толщиной 12 мкм с помощью ракеля. Равномерно распределенную смесь высушивали при 80 °С не менее 30 мин. После сушки из полученного электрода вырубали диски нужного диаметра с помощью установки вырубki электродов.

В рамках работы проведено циклирование трех типов образцов ЛИА: первая и вторая группы батарей содержат экспериментальный анодный материал на основе биоугля, полученного путем карбонизации соломы озимой пшеницы; третья группа изготовлена с использованием коммерческого графита AGP-2. На рисунках 8–10 представлены графики для каждой батареи, отражающие удельную емкость, кулоновскую

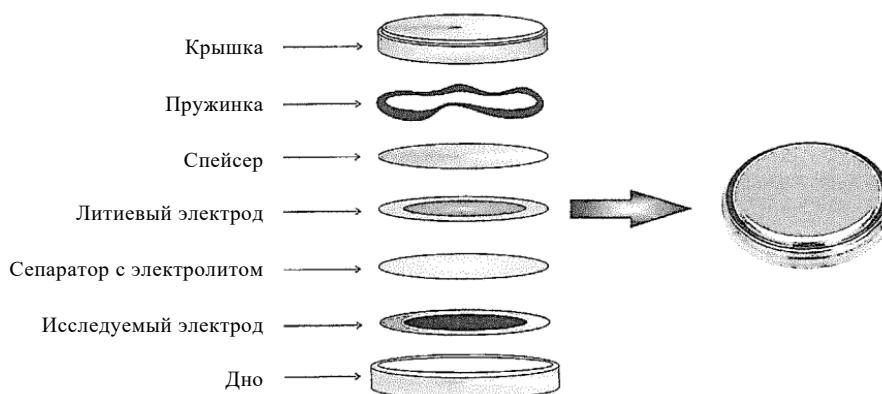


Рисунок 6. Схема сборки литий-ионного аккумулятора

Figure 6. Lithium-ion battery: Assembly diagram

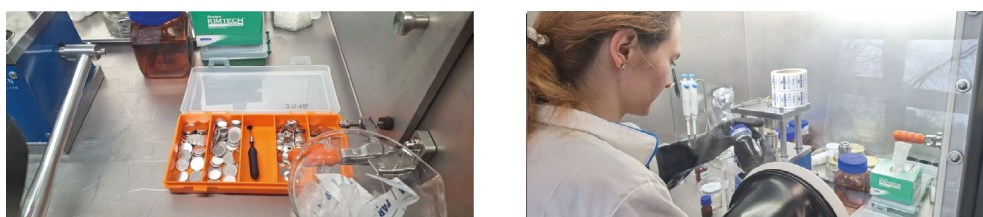


Рисунок 7. Процесс сборки литий-ионного аккумулятора

Figure 7. Assembling a lithium-ion battery

Таблица 5. Рецепт анода для литий-ионного аккумулятора

Table 5. Anode formulation for lithium-ion batteries

| Вещество                             | Количество, г |
|--------------------------------------|---------------|
| Карбоксиметилцеллюлоза               | 0,9470        |
| Высокопроводящий технический углерод | 0,0341        |
| Биоуголь                             | 0,5000        |
| H <sub>2</sub> O                     | 0,5000–0,8500 |
| Стирол-бутадиеновый каучук           | 0,0497        |

эффективность и потенциал-емкостную кривую. Различия между кривыми определяются не только природой активного материала, но и тем, что основная часть данных относится к самым ранним циклам, когда максимально проявляются необратимые потери лития, структурная релаксация электрода и образование твердого защитного межфазного слоя (Solid Electrolyte Interphase, SEI) на отрицательном электроде в результате разложения электролита уже во время самого первого цикла заряда.

Для аморфного углерода характерно хранение лития одновременно на поверхностных дефектных центрах, в неупорядоченных псевдографитных доменах и в нанопорах, поэтому его потенциал-емкостная кривая обычно имеет выраженную наклонную область и заметный гистерезис между литированием и делитированием. Для графита, напротив, характерны относительно четкие плато, которые связаны со стадийной интеркаляцией лития в слоистую структуру, при этом поведение на пер-

вом цикле обычно более предсказуемо по форме, однако также сопровождается образованием SEI. На рисунке 8 представлены графики циклирования для образцов первой группы, содержащих биоуголь на аноде.

График изменения удельной емкости (рис. 8а) показывает, что на первом цикле наблюдается anomalously высокая разрядная емкость по сравнению с последующими циклами. Это свидетельствует о значительном вкладе необратимых процессов первого цикла, прежде всего связанных с формированием SEI и захватом части лития в дефектной структуре аморфного углерода. Последующие точки расположены значительно ниже первого цикла, но сохраняются на уровне, сопоставимом с графитовым контрольным образцом или превышают его. Такая картина означает, что начальная экстремально высокая емкость не должна интерпретироваться как полностью полезная обратимая емкость материала: существенная ее часть расходуется на сопутствующие процессы формирования интерфейса,

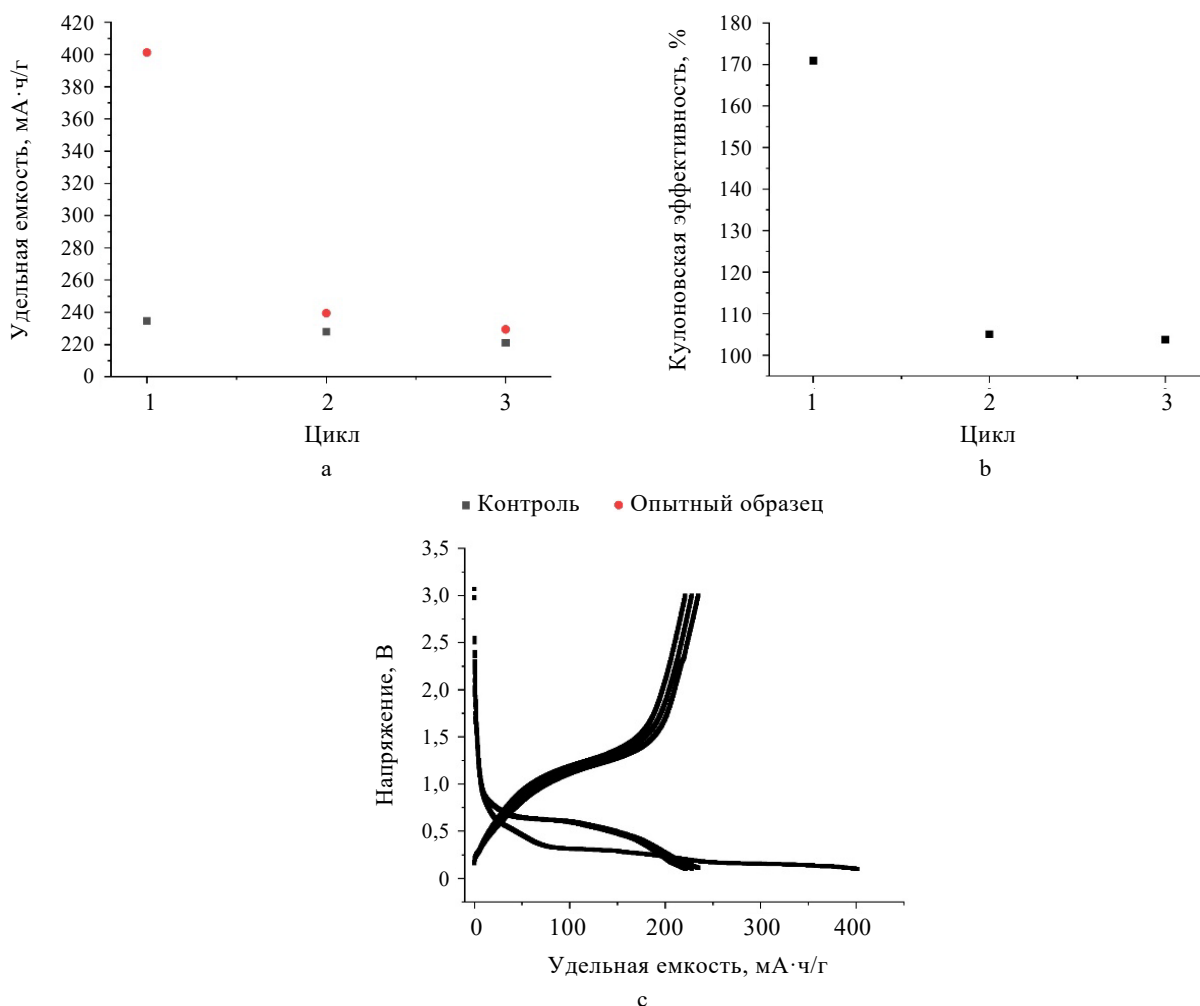


Рисунок 8. Исследование образцов литий-ионного аккумулятора первой группы, содержащих биоуголь: а – изменение удельной емкости; б – кулоновская эффективность батарей; с – потенциал-емкостная кривая

Figure 8. Electrochemical performance of group 1 lithium-ion cells containing biochar: a – specific capacity dynamics; b – coulombic efficiency; and c – galvanostatic charge-discharge profiles

однако остаточная обратимая емкость после стабилизации выглядит перспективной для дальнейшей оптимизации состава электрода и электролита.

Кулоновская эффективность (рис. 8b) демонстрирует аномально высокое значение на первом цикле с последующей стабилизацией вблизи 100 %. С точки зрения физики аккумулятор не может работать с эффективностью выше 100 %, поэтому полученные данные на начальном цикле связаны с методическими особенностями: погрешностью измерений, неточной настройкой прибора или вычислительной ошибкой. Из графика следует, что наиболее интенсивные необратимые и переходные процессы происходят на первом цикле, в то время как дальнейшая работа системы отличается стабильностью. Для экспериментального анода это объясняется интенсивным формированием SEI на его поверхности на начальной стадии; после завершения ее формирования межфазная граница между электродом и электролитом стабилизируется.

Приведенный график зависимости напряжения от емкости (рис. 8c) имеет широкую наклонную область и выраженное расхождение между ветвями заряда и разряда. Это поведение типично для аморфного углерода или углеродных материалов типа hard-carbon, где литий заполняет не строго упорядоченные места, а различные структурные элементы: трещины, дефекты, микропоры и локально упорядоченные углеродные участки. Именно поэтому кривая характеризуется не четкими графитовыми плато, а плавным наклоном с областью накопления заряда при низком напряжении. Высокая емкость на первом цикле хорошо согласуется с тем, что при очень низком токе силой 0,0001 А литий успевает проникать в труднодоступные центры хранения, тогда как на более высоких токах такой материал обычно проявляет меньшую кинетическую устойчивость и большую нестабильность профиля. Графики для второго образца с биоуглем представлены на рисунке 9.

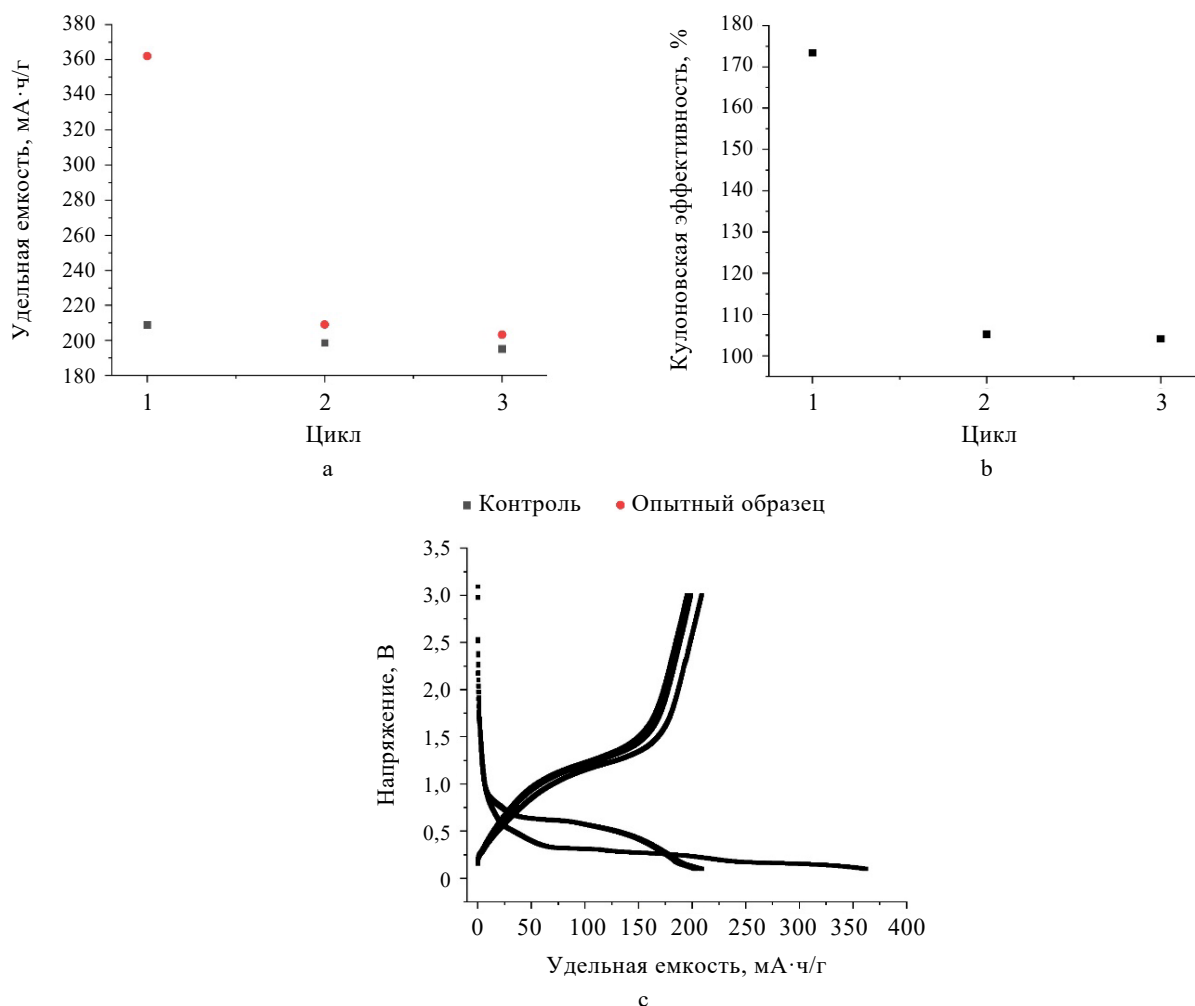


Рисунок 9. Исследование образцов литий-ионного аккумулятора второй группы, содержащих биоуголь: а – изменение удельной емкости; б – кулоновская эффективность батареи; с – потенциал-емкостная кривая

Figure 9. Electrochemical performance of group 2 lithium-ion cells containing biochar: a – specific capacity dynamics; b – coulombic efficiency; and c – galvanostatic charge-discharge profiles



График зависимости емкости образца (рис. 9а) качественно повторяет поведение первого элемента: первый цикл дает завышенную по сравнению со стабилизированным режимом емкость, после чего наблюдается резкое снижение значений и переход к более узкому диапазону. Это подтверждает единство механизмов работы анодов в обеих экспериментальных группах батарей.

Кулоновская эффективность элемента (рис. 9б) демонстрирует тот же характер: сильная аномалия на первом цикле и последующая стабилизация к 100 %. Такая воспроизводимость между двумя экспериментальными группами образцов свидетельствует о том, что наблюдаемое явление обусловлено либо спецификой первого цикла для данного типа анода, либо единым способом расчета и регистрации данных, а не со случайной особенностью отдельной ячейки. Потенциал-емкостная кривая образца (рис. 9с) практически идентична кривой элемента 1 и подтверждает, что экспериментальный материал функционирует по механизму, отличному от классического графита. Плавный наклон кривой указывает на заполнение литием различных энергетических позиций, в отличие от строго определенных мест в образце с графитом. Заметная петля гистерезиса между зарядом и разрядом характерна для неупорядоченных углеродных материалов. Данный гистерезис возникает вследствие различий в скоростях заполнения и освобождения пор, структурной неоднородности материала, наличия слабо упорядоченных участков, а также перестройки поверхностной структуры электрода после первого цикла.

В отличие от экспериментального биоугля, промышленный графит (рис. 9а) характеризуется заметно меньшей удельной емкостью, причем это различие особенно выражено на первом цикле. При этом скорость падения емкости графита от цикла к циклу значительно ниже, чем у анода из биоугля, что свидетельствует о меньших необратимых потерях и большей предсказуемости коммерческого материала. Преимущество графита заключается не в высокой начальной емкости, а в воспроизводимости характеристик, лучшей кинетике при рабочих токах и более управляемом профиле деградации по сравнению с высокодефектным аморфным углеродом.

График кулоновской эффективности (рис. 9с) также демонстрирует аномально высокое значение на первом цикле с последующей стабилизацией на уровне около 100 %. Аналогичная аномалия наблюдается и для графитового контрольного образца, следовательно, превышение 100 % не может служить как аргумент в пользу более высокой истинной кулоновской эффективности экспериментального материала. По-видимому, в данных присутствует общий артефакт расчета или регистрации. При этом сама тенденция к стабилизации после первого цикла сохраняет интерпретационную ценность: она указывает на то, что как для графита, так и для экспериментального углерода первый цикл

является этапом формирования устойчивой межфазной структуры, после которого поведение системы приближается к обратимому режиму. Результаты исследования циклирования образца батареи с коммерческим графитом представлены на рисунке 10.

Потенциал-емкостная кривая образца с коммерческим графитом (рис. 10с) существенно отличается от экспериментальных образцов более компактной формой по оси емкости и наличием выраженных платообразных участков. Это соответствует механизму стадийной интеркаляции лития в графит, при котором заполнение межслоевых пространств происходит через последовательные фазовые состояния, а не через широкий набор дефектных состояний. Именно поэтому графитовый образец характеризуется меньшей суммарной емкостью, но при этом более структурированной и предсказуемой формой кривой. Сопоставление с экспериментальными образцами позволяет заключить, что основное различие в форме зарядных кривых – степень структурной упорядоченности углеродного материала: чем выше степень беспорядка, пористость и разнообразие локальных состояний, тем более наклонной, растянутой и гистерезисной становится кривая.

Совокупность полученных графиков показывает, что экспериментальный анодный материал обеспечивает более высокую стартовую удельную емкость в мягком токовом режиме, однако значительная часть этого преимущества на первом цикле обусловлена формированием SEI и другими необратимыми процессами. Поэтому корректнее говорить не о превосходной электрохимической эффективности, а о повышенной исходной способности к накоплению лития в сочетании с большей необратимостью и, вероятно, меньшей устойчивостью при повышенных токах.

Графит AGP-2, напротив, характеризуется меньшей емкостью, но при этом более типичным и предсказуемым поведением. Различия в форме зарядных кривых указывают на принципиально разные механизмы хранения лития: в графите ионы лития внедряются между упорядоченными слоями в строго определенных позициях, тогда как в экспериментальном аноде литий распределяется по доступным трещинам, порам и дефектам.

## Выводы

Масштабирование сельскохозяйственной отрасли приводит к увеличению объемов отходов в виде соломы, традиционные методы утилизации которой наносят значительный экологический ущерб планете. Параллельно с этим интенсификация производства литий-ионных аккумуляторов (ЛИА) сопровождается ростом спроса на невозобновляемые минеральные ресурсы и увеличением объемов выбросов парниковых газов в ходе изготовления анодных материалов.

В целях решения обозначенных экологических и ресурсных проблем сформулирована гипотеза о возможности использования соломы пшеницы в качестве

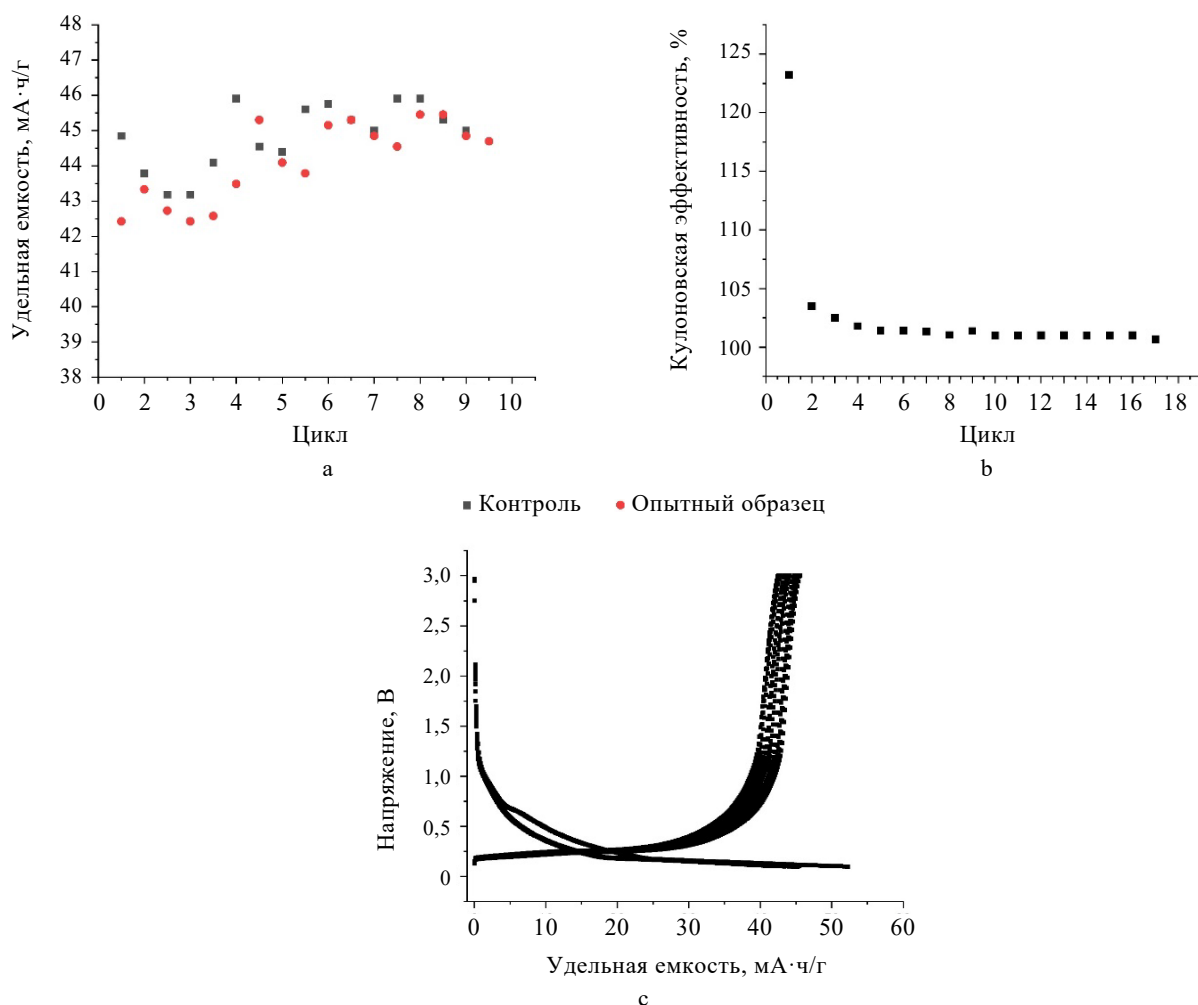


Рисунок 10. Исследование образцов литий-ионного аккумулятора третьей группы, содержащих биоуголь: а – изменение удельной емкости; б – кулоновская эффективность батареи; с – потенциал-емкостная кривая

Figure 10. Electrochemical performance of group 3 lithium-ion cells containing biochar: a – specific capacity dynamics; b – coulombic efficiency; and c – galvanostatic charge-discharge profiles

прекурсора для получения биоугля с последующей интеграцией полученного углеродного материала в состав анодных электродов ЛИА.

Результаты элементного состава соломы озимой пшеницы показали высокое содержание общего углерода (44,2 % от сухой массы), что подтверждает перспективность данного сырья для углеродной конверсии. Для переработки выбрана методика гидротермальной карбонизации как наиболее технологически и экологически оптимальная. Опытным путем установлены оптимальные условия карбонизации: температура реакционной среды 260 °С, продолжительность нагревания 60 мин и гидромодуль 1:12 (сухое вещество:вода). На выходе массовая доля углерода в биоугле возросла до 61,33 %. Для улучшения структурно-пористых характеристик и повышения содержания углерода в готовом продукте биоуголь подвергали многостадийному пиролизу, по завершении которого концентрация углерода в конечном продукте достигала 80–95 %.

Для эффективного использования в ЛИА углеродный материал должен обладать развитой системой межчастичных каналов для ионов лития. Анализ распределения частиц показал средний размер (26,235 мкм), что соответствует стандартам и подтверждает способность биоугля формировать эффективную перколяционную сеть.

На основе разработанного биоугля изготовлен анод, на котором собран ЛИА и проведен анализ циклирования в сравнении с коммерческим образцом. Исследование показало, что опытный образец обладает высокой стартовой емкостью за счет аморфной структуры (заполнение пор и дефектов), однако характеризуется пониженной стабильностью, значительными необратимыми потерями на формирование твердого защитного межфазного слоя и меньшей устойчивостью при повышенных токах.

Таким образом, использование возобновляемого сырья в виде соломы озимой пшеницы в производстве

адонов для ЛИА представляет перспективную область, требующую дальнейших исследований. Данный подход позволит реализовать замкнутый углеродный цикл в рамках концепции циркулярной экономики. Переработка сельскохозяйственных отходов в высокотехнологичные углеродные структуры не только минимизирует экологическую нагрузку на агропромышленные территории, но и существенно снижает совокупный углеродный след индустрии накопителей энергии.

#### Критерии авторства

Н. А. Муравьева – подготовка первоначального текста статьи, проведение экспериментов, сбор данных. Н. Ю. Наветный, Д. А. Полыньёв – проведение экспериментов, сбор данных, создание графиков, схем, иллюстраций. Е. В. Примаченко – статистический и теоретический анализ данных, редактирование и доработка текста. Я. А. Масютин – предоставление материалов, оборудования, финансирования. М. Ирфан –

проверка результатов на воспроизводимость, научное руководство проектом.

#### Contribution

N.A. Muravieva drafted the manuscript, conducted the experiments, and collected the data. N.Yu. Navetnykh and D.A. Polynev conducted the experiments, collected the data, and provided the visualization. E.V. Primachenko performed the statistical analysis, wrote the review, and proofread the manuscript. Ya.A. Masyutin provided the research materials, equipment, and funding. M. Irfan verified the results and supervised the project.

#### 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. Роньжина Е. С. Озимая и яровая пшеница (*Triticum aestivum* L.) в агроклиматических условиях Калининградской области. Известия КГТУ. 2018. № 51. С. 100–110. [Ronzhina ES. Winter and spring wheat (*Triticum aestivum* L.) in agro-climatic conditions of the Kaliningrad region. Proceedings of KSTU. 2018;(51):100–110. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/VKJZKN>
2. Богатырева Е. Н., Серая Т. М., Бирюкова О. М., Кирдун Т. М., Белявская Ю. А. и др. Коэффициент пересчета зерна и семян в побочной продукции и содержание основных элементов питания в побочно продукции сельскохозяйственных культур в Республике Беларусь. Почвоведение и агрохимия. 2016. № 2. С. 78–89. [Bogatyreva EN, Seraya TM, Biryukova OM, Kirdun TM, Belyavskaya YuA, et al. The conversion factor for grain and seeds in by-products and the content of key nutrients in by-products of agricultural crops in the Republic of Belarus. Soil Science and Agrochemistry. 2016;(2):78–89. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/YQILAT>
3. Xing X, Zhou Y, Lang J, Chen D, Cheng S, et al. Spatiotemporal variation of domestic biomass burning emissions in rural China based on a new estimation of fuel consumption. Science of the Total Environment. 2018;626:274–286. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.048>
4. Самсонова Н. Е. Использование соломы в качестве органического удобрения. Смоленск: Смоленская государственная сельскохозяйственная академия, 2014. 16 с. [Samsonova NE. Using straw as an organic fertilizer. Smolensk; Smolensk State Agricultural Academy, 2014. 16 p. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/YWOGKT>
5. Qiao YQ, Cao CF, Zhao Z, Du SZ, Zhang YL, et al. Effects of straw returning and N fertilizer application on yield, quality and occurrence of *Fusarium* head blight of wheat. Journal of Triticeae Crops. 2013;33:727–731.
6. Тарабанько В. Е., Коропачинская Н. В., Кудряшев А. В., Первышина Е. П., Кузнецов Б. Н. и др. Исследование процесса переработки пшеничной соломы в ароматические альдегиды и левулиновую кислоту. Химия растительного сырья. 1998. № 3. С. 59–64. [Tarabanko VE, Koropachinskaya NV, Kudryashev AV, Pervyshina EP, Kuznetsov BN, et al. Study of the process of processing wheat straw into aromatic aldehydes and levulinic acid. Chemistry of Plant Raw Materials. 1998;(3):59–64. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/HYSSHP>
7. Santulli C. The use of wheat straw as an agricultural waste in composites for semi-structural applications. In: Thakur VK, Thakur MK, Kessler MR, editors. Handbook of Composites from Renewable Materials. 2017. p. 515–531. <https://doi.org/10.1002/9781119441632.ch38>
8. Shafaet A, Srinivas J, Madhav Y. Biodegradable films from the lignocellulosic fibers of wheat straw biomass and the effect of calcium ions. International Journal of Biological Macromolecules. 2024;264(1):130601. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.130601>
9. Zhang L, Jiang J, Holm N, Chen F. Mini-chunk biochar supercapacitors. Journal of Applied Electrochemistry. 2014; 44(10):1145–1151. <https://doi.org/10.1007/s10800-014-0726-7>
10. Seroka N, Luo H, Khotseng L. Biochar-derived anode materials for lithium-ion batteries: A review. Batteries. 2024; 10:144. <https://doi.org/10.3390/batteries10050144>
11. Shi Z, Jin Y, Han T, Yang H, Gond R, et al. Bio-based anode material production for lithium-ion batteries through catalytic graphitization of biochar: The deployment of hybrid catalysts. Scientific Reports. 2024;14:3966. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-54509-8>

12. Manyà J, Gascó G. Biochar as a sustainable resource to drive innovative green technologies. In: Manyà JJ, Gascó G, editors. *Biochar as a renewable-based material: With applications in agriculture, the environment and energy*. New Jersey: World Scientific Publishing Europe Ltd.; 2021. pp. 1–33.
13. Kane S, Storer A, Xu W, Ryan C, Stadie NP. Biochar as a renewable substitute for carbon black in lithium-ion battery electrodes. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*. 2022;10(37):12226–12233. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.2c02974>
14. Трешкина Ю. И., Крюков А. Ю., Самодуров А. А., Братков И. В., Десятов А. В. Сферический графит для анодов литий-ионных аккумуляторов. *Успехи в химии и химической технологии*. 2024. Т. 38. № 8. С. 112–115. [Treshkina YuI, Kruykov AYU, Samodurov AA, Bratkov IV, Desyatov AV. Spherical graphite for lithium-ion battery anodes. *Advances in Chemistry and Chemical Technology*. 2024;38(8):112–115. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/MLWBTO>
15. Kulkarni S, Huang T, Thapaliya B, Luo H, Dai S, *et al.* Prospective life cycle assessment of synthetic graphite manufactured via electrochemical graphitization. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*. 2022;10(41):13607–13618. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.2c02937>
16. Ding C, Gan Y, Cui Y, Luo J. Wheat straw biochar and its performance in treatment of phenanthrene containing water and microbial remediation of phenanthrene contaminated soil. *Frontiers in Environmental Science*. 2022;10:1039603. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.1039603>
17. Vernardou D, Psaltakis G, Tsubota T, Katsarakis N, Kalderis D. Challenges and perspectives of biochar anodes for lithium-ion batteries. *Future Batteries*. 2024;4:100011. <https://doi.org/10.1016/j.fub.2024.100011>
18. Sarma H, Sun J, Hora Y, Forsyth M, Byrne N. Effect of carbonization behaviour of cotton biomass in electrodes for sodium-ion batteries. *ChemElectroChem*. 2023;10(14):e202300127. <https://doi.org/10.1002/celec.202300127>
19. Khan T, Saud A, Jamari S, Hasbi M, Rahim M, *et al.* Hydrothermal carbonization of lignocellulosic biomass for carbon rich material preparation: A review. *Biomass and Bioenergy*. 2019;130:105384. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.105384>
20. Харина М. В., Терехова Л. М., Емельянов В. М. Состав, структура и перспективы энергоресурсосберегающей переработки соломы злаковых культур. *Вестник Казанского технологического университета*. 2014. Т. 17. № 24. С. 168–174. [Kharina MV, Terekhova LM, Emelyanov VM. Composition, structure and prospects for energy- and resource-saving processing of cereal straw. *Bulletin of Kazan Technological University*. 2014;17(24):168–174. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/TNHJKR>

#### Дополнительная информация об авторах / Additional information about the authors

Муравьева Наталья Александровна / Natalia A. Muravieva ORCID 0000-0001-7783-5143; eLIBRARY SPIN 6916-6936  
Наветный Никита Юрьевич / Nikita Yu. Navetnykh  
Полыньёв Данила Алексеевич / Daniil A. Polynev ORCID 0009-0003-3101-4982  
Примаченко Елизавета Васильевна / Elisaveta V. Primachenko ORCID 0009-0005-2209-1657; eLIBRARY SPIN 3727-3240  
Масютин Яков Андреевич / Yakov A. Masyutin ORCID 0000-0003-4347-3425; eLIBRARY SPIN 2467-9765  
Ирфан Мухамед / Muhammad Irfan ORCID 0000-0003-2955-4237



## 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](http://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](http://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](http://fptt.ru/en) or email them to [fptt98@gmail.com](mailto: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](http://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](mailto: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>Ширшова А. А., Храпов А. А., Агеева Н. М., Аль-Накиб Е. А., Глоба Е. В., Сердюков И. В., Изофатов А. Р.</i> Влияние дрожжей рода <i>non-Saccharomyces</i> на показатели качества сидров ..... 434                                                          | <i>Потураев В. А., Миллер Е. С., Ларичев Т. А., Альтишлер О. Г., Милентьева И. С.</i> Режимы прессования кедрового ореха, обеспечивающие качество и биологическую ценность масла ..... 543                                                           |
| <i>Мяконосов Д. С., Абрамов Д. В., Кашиникова О. Г.</i> Сравнительная эффективность гидролиза куриным и свиным пепсином субстратов молочного и мясного происхождения ..... 451                                                                                | <i>Хиен Б. Т. Т., Диём Ф. Т., Ан Д. В., Зуен Ф. Т., Нгуен Н. В., Бат Н. К.</i> Приправа для риса на основе ферментированных водорослей ( <i>Sargassum</i> spp.): разработка рецептуры и оптимизация компонентного состава ..... 557                  |
| <i>Бурак Л. Ч., Лукин А. А., Гриценко А. В., Тимошук И. В., Горелкина А. К.</i> Нетермические технологии обработки сырого молока: микробиологическая безопасность и качество ..... 465                                                                        | <i>Бородин Е. Е., Колпакова Д. Е., Гордиенко А. В., Плешивцев И. И., Карчин К. В.</i> Молекулярные механизмы микробной биоминерализации: роль белковых молекул ..... 565                                                                             |
| <i>Попова Е. А., Кригер О. В.</i> Сравнительная оценка действия цитокининов на морфогенез и накопление фенольных соединений у <i>Hyssopus officinalis</i> в культуре <i>in vitro</i> ..... 481                                                                | <i>Глухарев А. Ю., Волченко В. И., Гроховский В. А., Колотова Д. С.</i> Жир из рыбного сырья в технологии колбасных изделий: перспективы и проблемы использования ..... 584                                                                          |
| <i>Чугунова О. В., Тимакова Р. Т., Акулич А. В., Самуйленко Т. Д., Лыбенко Е. С.</i> Управление микрофлорой ржаных заварок при дискретном режиме производства хлеба ..... 492                                                                                 | <i>Барковская И. А., Королёва П. И., Косарева А. В., Туровская С. Н., Рыбакова Е. Е., Ярышев В. Ю., Юрова Е. А., Семипятный В. К., Галстян А. Г.</i> Спектральные маркеры деградации липидного профиля сухого цельного молока при хранении ..... 610 |
| <i>Фасхутдинова Е. Р., Афонина Ю. Е., Шевель А. А., Евдокимов В. С., Нешумаева Н. А., Аксенова Л. М., Федорова А. М.</i> Оценка антагонистических свойств представителей рода <i>Pantoea</i> в отношении фитопатогенов сельскохозяйственных культур ..... 504 | <i>Давыденко Н. И., Зирка А. Ю., Мирный Д. Д.</i> Ореховосеменное сырье как источник селена и его роль в обеспеченности населения микроэлементом ..... 623                                                                                           |
| <i>Попов А. М., Шафрай А. В., Косинов В. С., Подберезен Г. И., Сухоруков Д. В., Комаров С. С.</i> Определение товарного сорта ягод вишни с использованием сверточных нейронных сетей ..... 516                                                                | <i>Муравьева Н. А., Наветный Н. Ю., Поляньев Д. А., Примаченко Е. В., Масютин Я. А., Ирфан М.</i> Использование отходов зерноводства для производства литий-ионных аккумуляторов ..... 639                                                           |
| <i>Сурай Н. М., Панасенко С. В., Исаева Е. А., Соколова Е. Ю.</i> Крестьянские (фермерские) хозяйства России: анализ современного состояния и каналов сбыта фермерской продукции ..... 526                                                                    |                                                                                                                                                                                                                                                      |

## CONTENTS

|                                                                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                                 |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <i>Shirshova A.A., Khrapov A.A., Ageyeva N.M., Al-Nakib E.A., Globa E.V., Serdyukov I.V., Izofatov A.R.</i> Effect of Non-Saccharomyces Yeasts on Cider Quality ..... 435                           | <i>Poturaev V.A., Miller E.S., Larichev T.A., Altshuler O.G., Milentyeva I.S.</i> Technological Modes for Pine Nut Oil: Preserving Quality and Biological Value ..... 544                                                                       |
| <i>Myagkonosov D.S., Abramov D.V., Kashnikova O.G.</i> Hydrolysis of Dairy and Meat Substrates by Chicken vs. Porcine Pepsin ..... 450                                                              | <i>Hien B.T.T., Diem P.T., An D.V., Duyen P.T., Nguyen N.V., Bat N.K.</i> Fermented <i>Sargassum</i> -Based Seafood Rice Seasoning: Prototype Development and Mix Design Optimization ..... 556                                                 |
| <i>Burak L.Ch., Lukin A.A., Gritsenko A.V., Timoshchuk I.V., Gorelkin A.K.</i> Non-Thermal Technologies for Raw Milk Processing: Microbiological Safety and Quality ..... 466                       | <i>Borodina E.E., Kolpakova D.E., Gordiyenko A.V., Pleshivtsev I.I., Karchin K.V.</i> Molecular Mechanisms of Microbial Biomining: Protein Mechanisms ..... 566                                                                                 |
| <i>Popova E.A., Kriger O.V.</i> Effect of Cytokinins on Morphogenesis and Accumulation of Phenolic Compounds in <i>Hyssopus officinalis</i> : A Comparative Study <i>in vitro</i> ..... 482         | <i>Glukharev A.Yu., Volchenko V.I., Grokhovsky V.A., Kolotova D.S.</i> Fish-Based Oil in Sausage Production Technology: Prospects and Challenges ..... 585                                                                                      |
| <i>Chugunova O.V., Timakova R.T., Akulich A.V., Samoylenko T.D., Lybenko E.S.</i> Control of Rye Scolding Microflora in Discrete Bread Production ..... 493                                         | <i>Barkovskaya I.A., Koroleva P.I., Kosareva A.V., Turovskaya S.N., Rybakova E.E., Yaryshev V.Yu., Yurova E.A., Semipyatnyi V.K., Galstyan A.G.</i> Spectral Degradation Markers in Lipid Profile of Whole Milk Powder during Storage ..... 611 |
| <i>Faskhutdinova E.R., Afonina Y.E., Shevel A.A., Evdokimov V.S., Neshumaeva N.A., Aksenova L.M., Fedorova A.M.</i> Antagonistic Properties of <i>Pantoea</i> against Crop Phytopathogens ..... 505 | <i>Davydenko N.I., Zirka A.Yu., Mirny D.D.</i> Nuts and Seeds as a Source of Selenium in the National Diet ..... 624                                                                                                                            |
| <i>Popov A.M., Shafray A.V., Kosinov V.S., Podberezen G.I., Sukhorukov D.V., Komarov S.S.</i> Convolutional Neural Networks in Commercial Grading of Cherry ..... 517                               | <i>Muravieva N.A., Navetnykh N.Yu., Polynev D.A., Primachenko E.V., Masyutin Y.A., Irfan M.</i> Grain Industry Waste in Lithium-Ion Battery Production ..... 640                                                                                |
| <i>Suray N.M., Panasenkov S.V., Isaeva E.A., Sokolova E.Yu.</i> Smallholder Farms in Russia: Status and Sales Channels ..... 527                                                                    |                                                                                                                                                                                                                                                 |