

Том 56, № 1, 2026
Vol. 56, № 1, 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

Food Processing: Techniques and Technology is an open access, double-blind peer-reviewed quarterly journal that encompasses a wide range in the food industry and agricultural science in Russia and neighboring regions.

The Journal's mission is to present, integrate and disseminate the most important results of fundamental and applied research in the food industry of Russia and the CIS countries. We aim to create scientific content that would reflect the current state of food science.

The Journal is addressed to practicing professionals, scientists, academics, and students.

Food Processing: Techniques and Technology is accepted by Scopus (Q2/Q3),

DOAJ, Russian Science Citation Index, "White list" (Russia) – 2 level, Dimensions, LENS.ORG, Agris, FSTA, ProQuest, etc.

Authors of articles published in the Journal retain the copyright of their articles. All articles are licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International Public License (CC BY 4.0), which permits their use, sharing, adaptation, distribution, and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source.

Food Processing: Techniques and Technology is an open access journal. Our open access policy follows the Budapest Open Access Initiative (BOAI), which

means that all our articles are available online immediately upon publication. Full-text electronic versions of all published materials appear in open access on fptt.ru/en and elibrary.ru

Food Processing: Techniques and Technology publishes scientific articles, reviews, and research briefs in the following areas: food systems; biotechnology; food production technology; sanitation and health; chemistry and ecology; agricultural and biological sciences (miscellaneous); biosecurity; zootechnics; general veterinary; electrotechnologies; and agro-industrial machines and equipment.

For submission instructions, subscription, and all other information visit this journal online at fptt.ru/en

Editor-in-Chief

Alexander Yu. Prosekov, Academician of the Russian Academy of Sciences, Dr. Sci. (Eng.), Dr. Sci. (Biol.), Kemerovo State University, Kemerovo, Russia.

Deputy Editor-in-Chief

Olga O. Babich, Dr. Sci. (Eng.), Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia.

Editorial Board Member

Evgeny V. Abakumov, Professor of the Russian Academy of Sciences, Dr. Sci. (Biol.), St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia;

Igor V. Altukhov, Dr. Sci. (Eng.), Industrial Technological Innovations LLC, Irkutsk, Russia;

Vladimir V. Bakharev, Dr. Sci. (Chem.), Samara State Technical University, Samara, Russia;

Svetlana M. Bychkova, Dr. Sci. (Econ.), Gatchina State Institute University, Gatchina, Russia;

Aram G. Galstyan, Academician of the Russian Academy of Sciences, Dr. Sci. (Eng.), All-Russia Dairy Research Institute, Moscow, Russia;

Irina A. Ganieeva, Dr. Sci. (Econ.), Research and Academic Centre "Kuzbass", Kemerovo, Russia;

Galina M. Gritsenko, Dr. Sci. (Econ.), Siberian Federal Scientific Centre of Agro-BioTechnologies of the Russian Academy of Sciences, Krasnoobsk, Russia;

Alexandra V. Zaushintsena, Dr. Sci. (Biol.), Kemerovo State University, Kemerovo, Russia;

Yujun Jiang, Ph.D., College of Food Science, Northeast Agricultural University, Harbin, China;

Anna B. Kapranova, Dr. Sci. (Econ.), Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russia;

Nikolai I. Kashevarov, Academician of the Russian Academy of Sciences, Dr. Sci. (Agr.), Siberian Federal Scientific Centre of Agro-BioTechnologies of the Russian Academy of Sciences, Krasnoobsk, Russia;

Vladimir G. Lobanov, Dr. Sci. (Eng.), Kuban State Technological University, Krasnodar, Russia;

Olga A. Frolova, Dr. Sci. (Econ.), Nizhny Novgorod Engineering-economic State University, Knyaginino, Russia;

Vladimir N. Khmelev, Dr. Sci. (Eng.), Biysk Technological Institute, Altai State Technical University, Biysk, Russia;

Yuri S. Khotimchenko, Dr. Sci. (Biol.), Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia;

Sergey V. Shakhov, Dr. Sci. (Eng.), Voronezh State University of Engineering Technologies, Voronezh, Russia;

Igor V. Yudaev, Dr. Sci. (Eng.), Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin, Krasnodar, Russia.

All articles are licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License.

Executive Editor: A.I. Loseva

Publishing Editor: E.V. Dmitrieva

Literary Editors: E.R. Shakirzyanova, E.A. Krivosheeva

Proofreaders: L.S. Starikova, E.R. Shakirzyanova

English Editor: N.V. Rabkina

Computer layout design: E.V. Volkova

Founder, Publisher and Editorial: Kemerovo State University, 6, Krasnaya Str., Kemerovo, Kemerovo region – Kuzbass, 650000, Russia

phone: +7(3842) 58-80-24

e-mail: fptt98@gmail.com

Printing Office: Kemerovo State University, 73, Sovetskiy Ave., Kemerovo, Kemerovo region – Kuzbass, 650000, Russia

Date of issue March 31, 2026

Printed sheet 23.72 conventional printed
Circulation 500 cop.

Open price. Issued 4 times a year

Full-texts are available online at fptt.ru/en,
elibrary.ru, e.lanbook.com, cyberleninka.ru

© Layout, accompanying text, editorial
and publishing design,

Kemerovo State University, 2026

Национальный, рецензируемый научный журнал, посвященный вопросам пищевой промышленности и смежных отраслей. Журнал включен в SCOPUS, RSCI, ЕГПНИ (Белый список) – второй 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

интеллектуальной, преодоление разрыва между изданиями регионального, национального и федерального уровней.

Журнал призван освещать актуальные проблемы в пищевой и смежных отраслях, продвигать новые перспективные технологии в широкую аудиторию научных и практических работников, преподавателей, аспирантов, студентов, предпринимателей, а также оказывать содействие в процессе подготовки высококвалифицированных специалистов.

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

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

Главный редактор:

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

Зам. главного редактора:

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

Редакционная коллегия:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Материалы публикуются на условиях лицензии CC BY 4.0.

Выпускающий редактор: А.И. Лосева

Ответственный за выпуск: Е.В. Дмитриева

Литературные редакторы: Э.Р. Шакирзянова, Е.А. Кривошеина

Корректоры: Л.С. Старикова, Э.Р. Шакирзянова

Литературный редактор (англ. язык): Н.В. Рабкина

Дизайн и компьютерная верстка: Е.В. Волкова

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

тел.: +7 (3842) 58-80-24

e-mail: fptt98@gmail.com

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

Дата выхода в свет 31.03.26

Усл. п. л. 23,72. 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>

Агропромышленный комплекс – сложная многофункциональная система, играющая ключевую роль в обеспечении продовольственной безопасности и укреплении экономического суверенитета страны, при этом российский АПК, несмотря на вызовы, развивается и имеет существенный задел для наращивания экспортного потенциала.

По данным Правительства и Минсельхоза России, в 2025 г. АПК страны вырос на 5 %, обеспечив запасами зерна, мяса, рыбы, масла и сахара. Несмотря на неблагоприятные погодные условия, собран третий по объему в истории России урожай зерновых – около 142 млн т, в т. ч. более 93 млн т пшеницы. Масличные культуры продемонстрировали значительный рост. Увеличилось производство картофеля, сахарной свеклы, фруктов и овощей. В животноводстве также отмечается положительная динамика. Производство птицы достигло 7,3 млн т, а сырого молока – 34,2 млн т, что обусловлено ростом продуктивности молочного стада. Благодаря сохранению положительной динамики в аквакультуре, рыбохозяйственный комплекс удовлетворил потребности страны. Результаты, достигнутые в АПК в 2025 г., позволили выполнить основные параметры Доктрины продовольственной безопасности и укрепить самообеспеченность по ключевым отраслям.

Повышение эффективности АПК России во многом определяется внедрением современных технологий, включая цифровые решения и автоматизацию. Сегодня отрасль переживает глубокую технологическую трансформацию и, вопреки существующим проблемам, становится одним из флагманов внедрения инноваций. Ключевыми драйверами развития АПК выступают государственная поддержка и стратегическое планирование, а также цифровизация, роботизация и применение агробiotехнологий.

Для стимулирования инновационной активности и внедрения технологий государство применяет широкий спектр мер поддержки, который позволяет АПК России не только укреплять стабильность, но и активно развиваться в технологическом направлении.

Цифровизация АПК – комплексный процесс внедрения современных информационно-коммуникационных технологий во все аспекты сельскохозяйственного производства, включая точное земледелие, агроаналитику и Интернет вещей (IoT). Роботизация и автоматизация АПК осуществляются через внедрение автоматизированных комплексов, агротехники нового поколения, БПЛА и искусственного интеллекта, повышая эффективность, точность и стабильность производства и снижая зависимость от человеческого труда.

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

Агробiotехнологии способствуют повышению урожайности и устойчивости сельскохозяйственных культур с помощью генетически модифицированных организмов (ГМО), биопрепаратов, биоудобрений и селекции, а их дальнейшее развитие важно для конкурентоспособности российского АПК.

Ключевую роль в трансформации АПК играют современные информационно-технологические платформы, предоставляющие комплексные инструменты для оптимизации всех этапов сельскохозяйственного производства.

Цифровизацией сельскохозяйственного производства и процессами поддержки принятия агротехнологических решений активно занимается академик РАН, доктор технических наук, профессор Виктор Валентинович Альт.

Научные исследования ученого вносят значительный вклад в создание электронных измерительных устройств, информационно-измерительных комплексов и экспертных систем диагностики состояния биологических объектов и машин, систем автоматизации технологических процессов в сельском хозяйстве, а также баз данных и знаний о растениях, животных, фитосанитарном состоянии посевов сельскохозяйственных культур, болезнях животных, технологиях и технике. Среди основных результатов его деятельности можно выделить парадигму информационного обеспечения технологических процессов сельскохозяйственного производства, системы и приборы контроля и диагностики двигателей внутреннего сгорания, информационные модели машинотракторных агрегатов, агрофитоценозов, растений, болезней и вредителей сельскохозяйственных культур, мини-фитотроны и биотроны, системы дистанционного мониторинга полей и др.

Результаты научных исследований и разработок академика В. В. Альта находят широкое применение в производстве и образовательном процессе вузов России. За большой личный вклад в развитие аграрной науки, разработку и внедрение приборов, информационных систем для научного обеспечения АПК России академик РАН В. В. Альт награжден различными наградами и медалями.

В 2026 г. академик РАН, доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, академик Национальной академии наук Монголии, руководитель СибФТИ СФНЦА РАН Виктор Валентинович Альт отмечает юбилей – 80 лет! Кемеровский государственный университет и редакция журнала сердечно поздравляют Виктора Валентиновича с этой знаменательной датой. Искренне желаем крепкого здоровья и благополучия, неиссякаемой энергии и вдохновения для новых идей и достижений, спокойствия и тепла в кругу родных, коллег и учеников!

А. Ю. Просков 

<https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-1-2618>
<https://elibrary.ru/EOVXKO>

Оригинальная статья
<https://fptt.ru>

Ферментативные рыбные белковые гидролизаты из отходов переработки атлантической трески: влияние типа и концентрации фермента



Ю. А. Кучина¹, Д. С. Колотова¹, В. В. Толстиков²,
В. В. Василевич², С. Р. Деркач^{1,*}

¹ Мурманский арктический университет , Мурманск, Россия

² ООО «Эко Фиш», Санкт-Петербург, Россия

Поступила в редакцию: 14.05.2025

Принята после рецензирования: 15.08.2025

Принята к публикации: 13.01.2026

*e-mail: derkachsr@mauniver.ru

© Ю. А. Кучина, Д. С. Колотова, В. В. Толстиков,
В. В. Василевич, С. Р. Деркач, 2026



Аннотация.

Проблема использования отходов рыбопереработки в качестве вторичного сырья для получения продукции с добавленной стоимостью актуальна как для исследователей, так и для производителей. Одними из наиболее перспективных видов продукции являются гидролизаты рыбного белка, получаемые из побочных продуктов рыбопереработки. Рыбные белковые гидролизаты содержат незаменимые аминокислоты и биологически активные пептиды. Они могут быть использованы в качестве пищевых ингредиентов в составе продуктов питания. Цель данного исследования – оптимизировать традиционную технологию получения белкового гидролизата из вторичного рыбного сырья с использованием ферментативного гидролиза.

Объекты исследования – отходы атлантической трески (*Gadus morhua*) из Центрально-Восточного района Атлантики, белок-содержащее рыбное сырье (хребты с остатками мышечной ткани и плавников). В работе использованы пять ферментов: Панкреатин, Коллагеназу, Протозим В, Алкалазу 2,4 L FG и Энзи-Микс У – в широком диапазоне концентраций. Оптимизация традиционной технологии включала введение дополнительной стадии – обработку сырья раствором уксусной кислоты с целью улучшения органолептических свойств рыбных белковых гидролизатов. Также проведена оптимизация стадии щелочного растворения белковых молекул для увеличения степени растворения белков. Для характеристики полученных гидролизатов рыбного белка использованы методы химического анализа и метод высокоэффективной жидкостной хроматографии, определен аминокислотный состав и молекулярно-массовое распределение гидролизатов.

В результате исследования получены гидролизаты рыбного белка с высоким содержанием белка (85–90 %) и высоким аминокислотным скором (110–190 %) практически по всем незаменимым аминокислотам; выход продукта варьировался от 22 до 55 %. При исследовании влияния концентрации ферментного препарата установлено, что с повышением его концентрации с 1 до 8 г/кг сырья выход белкового гидролизата и степень гидролиза белка увеличивались. Однако при этом повышалось количество низкомолекулярных пептидов, что приводило к снижению органолептических характеристик продукта – появлялся горьковатый привкус и усиливался рыбный запах.

Таким образом, для использования в пищевых системах подходит только гидролизат, полученный под действием фермента Протозима В, при этом возможно изменять его концентрацию, либо сокращать продолжительность процесса ферментализации. Для получения высокого выхода белковых гидролизатов микробиологического назначения наиболее подходят ферментные препараты Панкреатин и Алкалаза 2,4 L FG.

Ключевые слова. Рыбные белковые гидролизаты, атлантическая треска, отходы переработки рыбы, ферментативный гидролиз, пищевые технологии

Для цитирования: 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>

Effect of Enzyme Type and Concentration on Fish Protein Hydrolysates from *Gadus morhua* Processing Waste



Yulia A. Kuchina¹, Daria S. Kolotova¹, Vladislav V. Tolstikov²,
Vasily V. Vasilevich², Svetlana R. Derkach^{1,*}

¹ Murmansk Arctic University , Murmansk, Russia

² Eko Fish Ltd, St. Petersburg, Russia

Received: 14.05.2025

Revised: 15.08.2025

Accepted: 13.01.2026

* e-mail: derkachsr@mauniver.ru

© Yu.A. Kuchina, D.S. Kolotova, V.V. Tolstikov, V.V. Vasilevich,
S.R. Derkach, 2026



Abstract.

Fish processing waste is a secondary raw material that can be used as part of value-added product systems. Fish protein hydrolysates contain essential amino acids and biologically active peptides that can be included in food formulations. This article introduces an improved enzymatic hydrolysis technology for obtaining protein hydrolysates from secondary fish raw materials.

The study featured Central-East Atlantic cod (*Gadus morhua*) and its processing waste, which included protein-containing backbones, muscle tissue, and fins. Five different enzymes (Pancreatin, Collagenase, Protozyme B, Alcalase 2.4 L FG, and Enzy-Mix U) were applied in a wide range of concentrations. The new technology involved one additional step to improve the sensory properties: protein hydrolysates were treated with an acetic acid solution. The alkaline dissolution stage was also optimized to increase the degree of protein solubility. The resulting hydrolysates underwent a chemical analysis and high-performance liquid chromatography. Other tests made it possible to reveal their amino acid composition and molecular weight distribution.

The fish protein hydrolysates demonstrated a high protein content of 85–90% and a high amino acid ratio (110–190%) for virtually all essential amino acids. The product yield ranged from 22 to 55%. As the concentration increased from 1 to 8 g per 1 kg of raw material, the yield of protein hydrolysate and the degree of protein hydrolysis also increased. However, the amount of low-molecular-weight peptides also grew, which spoils the sensory profile (bitter taste, strong fishy smell).

Only Protozyme proved suitable for the food industry: its concentration could be varied whereas the enzymolysis time could be shortened, if necessary. Pancreatin and Alcalase 2.4 L FG provided high-yield protein hydrolysates for microbiological use.

Keywords. Fish protein hydrolysate, *Gadus morhua*, fish processing waste, enzymatic hydrolysis, food technology

For citation: 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.) <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-1-2618>

Введение

Гидролизаты рыбного белка, получаемые из рыбного сырья, являются перспективными пищевыми ингредиентами [1, 2] и источниками различных аминокислот и биологически активных пептидов [3]. Интерес к изучению потенциального использования рыбных белковых гидролизатов (РБГ) в качестве пищевой добавки для производства функциональных продуктов питания неуклонно возрастает [4, 5]. Нутрицевтики, которые содержат гидролизаты белка, могут использоваться для профилактики и лечения различных заболеваний [6, 7], включая онкологические и сердечно-сосудистые [6, 8], гипертонию [9] и сахарный диабет 2 типа [10]. Гидролизаты рыбного белка и биоактивные пептиды проявляют антиоксидантную и антимикробную активность [11] и поэтому могут рассматриваться как заменители синтетических анти-

оксидантов для подавления окислительных процессов и продления сроков хранения продуктов [12, 13].

Гидролизаты рыбного белка могут быть включены в микробиологические питательные среды [14] в качестве источников пептонов – азотистых соединений пептидного происхождения. Они являются прекрасной альтернативой пептонам животного и / или растительного происхождения, поскольку не контактируют с прионами, вызывающими губчатую энцефалопатию крупного рогатого скота [15], и не подвергаются возможному генетическому модификациям, как это наблюдается с аналогичными веществами растительного происхождения [16]. Микробиологические питательные среды, обогащенные пептонами на основе гидролизатов рыбных белков, могут быть использованы для культивирования многих видов микроорганизмов, что обусловлено небольшой

длиной пептидов и большим количеством свободных аминокислот в их составе.

Гидролизаты рыбного коллагена считаются функциональными ингредиентами для производства различных косметических средств (крема, эмульсии, сыворотки) против старения кожи из-за их превосходных увлажняющих свойств [17, 18]. Также гидролизаты рыбного белка могут найти применение в качестве вкусоароматических и питательных ингредиентов в производстве кормов для животных [19].

Основным сырьем для промышленного производства РБГ являются отходы переработки рыбы. Рыбная промышленность ежегодно производит миллион тонн рыбных отходов, таких как шкуры, головы, плавники, внутренности, кости и т. д. Среднее содержание побочных продуктов составляет около 50 %, но в некоторых случаях варьируется от 10 до 90 % в зависимости от вида рыбы [20, 21]. Отходы переработки рыбы служат ценным источником незаменимых аминокислот, коллагена, полиненасыщенных жирных кислот и ферментов [22], а содержание белка в них колеблется от 8 до 35 % [23]. Однако в настоящее время рыбные отходы используются в промышленности в ограниченных количествах [20]. Существует острая необходимость в новых эффективных технологиях получения гидролизатов белков с учетом видов рыб. Разработка таких технологий будет способствовать глубокой переработке морских биологических ресурсов и созданию безотходных производств, что имеет важное значение для решения экологических проблем и вопросов охраны окружающей среды.

Традиционные методы получения гидролизатов белков включают химические (с использованием кислот и щелочей) и биологические (с использованием протеолитических ферментов) методы. Широко используется также термический способ гидролиза белоксодержащего рыбного сырья с применением высокотемпературного воздействия [24], которое в ряде случаев комбинируют с ферментативным воздействием [25].

Химический гидролиз белков рыб имеет ряд недостатков, среди которых использование концентрированных кислот и щелочей (при их нейтрализации образуется большое количество солей, также подлежащее удалению); частичное разрушение некоторых нестабильных аминокислот в кислой среде и коррозия оборудования под воздействием кислот. При химическом гидролизе в щелочной среде наблюдается изменение конфигурации аминокислот: часть L-аминокислот превращается в D-аминокислоты. Эти превращения снижают качество гидролизатов белков рыб и ограничивают их применение. Ферментативный гидролиз, который происходит под действием протеолитических ферментов, имеет ряд преимуществ. Процесс происходит в мягких условиях при значениях pH менее 8 и температурах 40–60 °C [26, 27], что исключает разрушение и трансформацию аминокислот, а также другие нежелательные побочные реакции.

Аминокислотный состав гидролизата рыбного белка, полученного методом ферментативного гидролиза, идентичен аминокислотному составу исходного белка.

Используемые ферменты проявляют свойства, уникальные для белковых веществ: они термолабильны и обладают pH-зависимой и субстрат-специфической активностью [28]. В результате ферменты значительно различаются по своей эффективности в отношении рыбных белков.

Контролируемый ферментативный гидролиз может улучшить функциональные свойства гидролизатов рыбных белков [29, 30] и сделать их более привлекательными для использования в пищевых рецептурах [31, 32].

Цель исследования – оптимизировать традиционную технологию получения белкового гидролизата из вторичного рыбного сырья с использованием ферментативного гидролиза. В работе использовались пять различных ферментов, обоснован выбор наиболее эффективного фермента с учетом его протеолитических свойств. Задачи исследования включали изучение физико-химических и технологических свойств ферментативных гидролизатов рыбных белков, а также определение влияния типа и концентрации фермента на свойства гидролизатов, предварительной кислотной обработки белоксодержащего сырья на органолептические свойства гидролизатов, времени ферментации на свойства рыбных белковых гидролизатов. В работе обсуждались рекомендации по практическому использованию полученных ферментативных белковых гидролизатов.

Объекты и методы исследования

Сырье. Атлантическая треска (*Gadus morhua*) выловлена в Центрально-Восточном районе Атлантики и доставлена в порт Мурманск (Россия), где была переработана в филе. Отходы этого процесса использовались в работе в качестве белоксодержащего рыбного сырья (хребты с остатками мышечной ткани и плавников). Отходы заморозили и хранили в течение 1 месяца при температуре не выше –18 °C. Химический состав белоксодержащего сырья: белок $10,9 \pm 0,4$ мас. %, влага $75,9 \pm 0,1$ мас. %, жир $0,60 \pm 0,05$ мас. %, минеральные вещества $12,5 \pm 0,4$ мас. %. Все химические реактивы, примененные в данной работе, были аналитической степени чистоты (Pro Analysis, Россия).

Ферменты. В работе использовали пять ферментных препаратов:

1. Панкреатин (ICN Biochemicals, США) – выделен из поджелудочной железы крупного рогатого скота и свиней; порошок светло-желтого цвета с характерным запахом, малорастворимый в воде; проявляет активность при pH 7,9–8,5 и 45–50 °C.

2. Коллагеназа (ООО ТД «Биопрепарат», Россия) – получена в результате культивирования селекционированного штамма бактерий *Streptomyces lavendulae* с последующей очисткой и концентрированием;

порошок желтого цвета с характерным запахом; проявляет активность при pH 7,0–9,0 и 35–55 °C.

3. Протеаза бактериальная щелочная – Протозим В (ООО ТД «Биопрепарат», Россия) – получен путем культивирования выделенного направленной селекцией природного штамма микроорганизмов *Bacillus licheniformis* с последующей очисткой и концентрированием, без применения технологий геной инженерии; порошок светло-желтого цвета; проявляет активность при pH 6,0–10,0 и 55–65 °C.

4. Алкалаза 2,4 L FG (Novozymes, Дания) – высокоэффективная бактериальная протеаза, специально разработанная для гидролиза всех видов белка; жидкость коричневого цвета, pH 5,2; проявляет активность при pH 6,0–8,5 и 40–45 °C.

5. Энзи-Микс У (ООО «Завод эндокринных ферментов», Россия) – энзимный препарат животной природы, содержащий комплекс кислых протеаз; порошок белого цвета; проявляет активность при pH 4,5–6,0 и 35–40 °C.

Получение рыбных белковых гидролизатов.

Рыбные белковые гидролизаты (РБГ) получены из отходов рыбопереработки атлантической трески в соответствии с технологической схемой, приведенной на рисунке 1.

Сырье размораживали при температуре 12 ± 2 °C. В ходе предварительной подготовки сырье измельчали (диаметр отверстий решетки 5 мм) и смешивали с дистиллированной водой в массовом соотношении 1:2. Затем смесь нагревали до температуры 40 ± 2 °C и доводили pH водной фазы до значений 8,5–9,0 5 М рас-

твором едкого натра. При этих условиях проводили щелочное растворение белков в течение 1 ч, постоянно перемешивали.

В реакционную смесь вносили ферментный препарат в количестве от 1,0 до 12,0 г/кг сырья; время внесения ферментного препарата считалось началом ферментализации. Ферментативный гидролиз проводили в течение 3 ч при температуре 50 ± 1 °C и постоянном перемешивании. Начальное значение pH реакционной среды – 8,0–8,5; конечное значение pH (через 3 ч) – 6,8–7,6 (при использовании Панкреатина, Коллагеназы, Протозима В, Алкалазы 2,4 L FG) и 6,5 (при использовании Энзи-Микс У). Уменьшение pH происходило в результате гидролитического расщепления белка до свободных аминокислот и пептидных фрагментов.

По окончании ферментализации для инактивации ферментного препарата реакционную смесь нагревали до $t = 90–95$ °C и выдерживали при постоянном перемешивании в течение 5–10 мин.

Затем реакционную смесь направляли на фильтрацию и центрифугирование для удаления негидролизованного сырья. В качестве фильтра использовали фильтровальную ткань бельтинг или несколько слоев фильтровальной бумаги марки «Черная лента». Центрифугирование проводили при 8000 об/мин в течение 40 мин.

Полученный раствор рыбного белкового гидролизата сушили в лиофильной сушилке FreeZone (Lab-conco, США) при температуре –50 °C и остаточном давлении 4–6 Па. Высушенный РБГ измельчали до размера частиц не более 0,2 мм.



Рисунок 1. Технологическая схема получения ферментативного рыбного белкового гидролизата

Figure 1. Technological scheme for obtaining enzymatic fish protein hydrolysate

Рыбный белковый гидролизат представляет собой однородный мелкодисперсный порошок, хорошо растворимый в воде.

Выход РБГ, %, рассчитывали по формуле (1):

$$\text{Выход} = \frac{m}{M} \times 100 \quad (1)$$

где m – масса сухого гидролизата, г; M – масса сухого сырья (с содержанием влаги не более 10 %), г.

Химический анализ белоксодержащего сырья и рыбных белковых гидролизатов (РБГ). Содержание влаги, жира, общего азота и минеральных веществ в сырье и РБГ определяли по стандартным методикам [33]. Влажность образцов определяли после их высушивания до постоянного веса при температуре 105 ± 5 °C; количество жира – методом Сокслета (экстракция растворителем); минеральных веществ – сжиганием образцов в муфельной печи при температуре 550 ± 10 °C.

Массовую долю общего азота (N_{TN} , %) определяли по методу Кьельдаля. Сущность метода заключается в разложении органического вещества пробы кипящей концентрированной серной кислотой с образованием солей аммония, переводе их в аммиак, отгонки аммиака паром в раствор серной кислоты, количественном определении аммиака методом обратного титрования.

Массовую долю веществ белковой природы, %, рассчитывали по формуле (2):

$$\text{Белок} = N_{\text{TN}} \times 6,25 \quad (2)$$

где 6,25 – это фактор пересчета количества общего азота на белок.

Массовую долю аминного азота (N_{AN} , %) определяли методом формольного титрования, который основан на связывании аминокрупп с формалином и косвенном определении их количества по результатам титрования карбоксильных групп.

Значения pH растворов (1,0 %) белковых гидролизатов определяли pH-метром Эксперт-001.

Степень гидролиза, %, рассчитывали по формуле (3):

$$\text{Степень гидролиза} = \frac{N_{\text{AN}}}{N_{\text{TN}}} \times 100 \quad (3)$$

где N_{AN} – массовая доля аминного азота, %; N_{TN} – массовая доля общего азота, %.

Молекулярно-массовое распределение. Молекулярно-массовое распределение РБГ определяли методом ВЭЖХ с использованием хромато-масс-спектрометра LCMS-QP8000 (Shimadzu, Япония) со спектрофотометрическим детектором (модель SPD – 10 AVVP) при $\lambda = 280$ нм. Хроматографическое разделение проводили на колонке Tosoh TSKgel Alpha-2500 (Tosoh Bioscience, Япония) при 25 °C в изократическом режиме, скорость потока 0,8 мл/мин, элюент – водный раствор NaCl с концентрацией 0,15 моль/л, объем пробы

10 мкл. Для калибровки колонки использовали белки с известной молекулярной массой от 12,4 (цитохром С) до 200 кДа (β -амилаза, Sigma-Aldrich, США); коэффициент корреляции 0,96. Среднемассовую молекулярную массу (M_w , кДа) рассчитывали по уравнению (4):

$$\lg M_w = -0,6617 \times V + 9,0638 \quad (4)$$

где V – объем элюента, прошедший через колонку, мл.

Молекулярно-массовое распределение образцов определяли также методом гель-проникающей хроматографии. Условия анализа: элюент – 0,5 М раствор уксусной кислоты; скорость потока – 0,8 мл/мин; $t = 30$ °C; детектор ELSD (низкотемпературный испарительный детектор светорассеяния); колонка TSK-GEL G3000SWXL (Tosoh Bioscience, Япония) – 7,8 мм ID $\times$ 30,0 см L, 5 мкм.

Аминокислотный состав. Аминокислотный состав белоксодержащего сырья и РБГ изучали методом ВЭЖХ, система LC-20 AD Prominence (Shimadzu, Япония) с реакционным модулем для пост-колоночной дериватизации APM-1000 (Sevko&Co, Россия) и колонкой с ионообменной смолой $4,6 \times 150$ мм (Sevko&Co, Россия).

Для пробоподготовки образцы подвергали гидролизу в растворе 6 М соляной кислоты (110 °C, 24 ч). Для определения цистеина и метионина образцы перед гидролизом обрабатывали растворами окислителей (Sevko&Co, Россия) до их полного окисления. После окончания гидролиза образцы сушили. Сухой остаток растворяли в натрий-цитратном буферном растворе (Sevko&Co, Россия) и пропускали через фильтр с диаметром пор 0,45 мкм (Agilent, США). Использовали стандартный образец раствора аминокислот (Sykam, Германия) для контроля качества измерений.

Аминокислотный скор (AAS, %) – отношение количества незаменимой аминокислоты (ЕАА) в исследуемом белке к количеству этой же аминокислоты в идеальном белке рассчитывали по уравнению (5):

$$\text{AAS} = \frac{\text{г ЕАА на 100 г исследуемого белка}}{\text{г ЕАА на 100 г идеального белка}} \times 100 \quad (5)$$

Результаты и их обсуждение

Влияние типа фермента на свойства рыбного белкового гидролизата (РБГ). Для получения ферментативных РБГ использовали пять различных видов ферментативных препаратов – Панкреатин, Коллагеназа, Протозим В, Алкалаза 2,4 L FG, Энзи-Микс У. Изучено влияние типа ферментного препарата на свойства полученных белковых рыбных гидролизатов.

Органолептические свойства полученного продукта во многом определяют способ его использования в качестве пищевых ингредиентов. Ферментативные белковые гидролизаты представляют собой однородные мелкодисперсные порошки от светло-бежевого до желтого цвета, хорошо растворимые в воде (рис. 2). На этом этапе почти все полученные образцы РБГ,

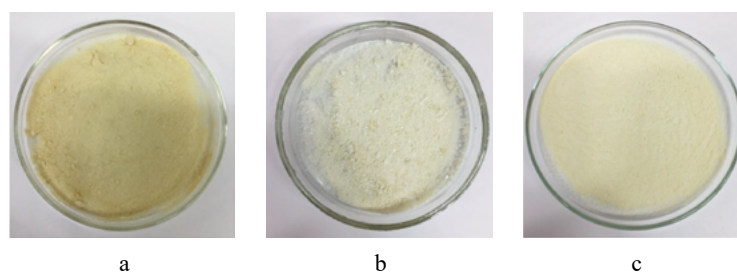


Рисунок 2. Образцы рыбных белковых гидролизатов, полученные ферментативным гидролизом с использованием различных ферментных препаратов: а – Панкреатин; б – Протозим В; с – Алкалаза 2,4 L FG

Figure 2. Fish protein hydrolysates obtained by enzymatic hydrolysis using various enzymes: a – Pancreatin; b – Protozyme B; and c – Alcalase 2.4 L FG

независимо от вида используемого фермента, имели рыбный запах, за исключением гидролизата, полученного с использованием фермента Энзи-Микс У. Этот фермент проявляет активность в кислой среде в растворе уксусной кислоты, поэтому ферментативный РБГ имеет слабый запах уксуса. Для получения гидролизатов рыбных белков используют и другие ферменты, например Протеиназу; гидролизаты обладают улучшенными функциональными свойствами [34].

Химический состав РБГ, полученных под действием различных ферментных препаратов, представлен в таблице 1.

Содержание белка в образцах составляло 85–88 %, содержание влаги не превышало 10 %. В выявленных образцах жир не обнаружен. Тип использованного ферментного препарата влияет на свойства продуктов. Рыбные белковые гидролизаты, полученные под действием Панкреатина и Алкалазы, имели наибольший выход продукта (49,1 и 54,8 %) и характеризовались высоким содержанием аминного азота, что свидетельствует о высокой степени гидролиза (более 25 %). В работе [36] визуализация рассеяния RGB-лазера в сочетании с процедурами машинного обучения используется для прогнозирования степени протеолиза рыбных субпродуктов. Рыбные белковые гидролизаты с высокой степенью гидролиза, содержащие большое количество свободных аминокислот и низкомолекулярных пептидов, могут быть использованы в составе микробиологических питательных сред.

Также в таблице 1 представлен аминокислотный состав рыбных белковых гидролизатов, полученных из белоксодержащего сырья – отходов переработки атлантической трески с использованием разных ферментов. Присутствие незаменимых аминокислот определяет биологическую и пищевую ценность полученного продукта. Показано высокое содержание аспарагиновой и глутаминовой кислот, что характерно для ферментативных гидролизатов рыбных белков [37].

Анализ аминокислотного состава показал, что гидролизат, полученный под действием фермента Энзи-Микс У, содержит наименьшее количество незаменимых

аминокислот (27,3 г/100 г белка). Использование щелочных протеиназ увеличивает содержание незаменимых аминокислот в гидролизатах до 38,0–39,9 г/100 г белка. Гидролизат, полученный с использованием Алкалазы 2,4 L FG, характеризуется наибольшей степенью расщепления белка (31,4 %) и выходом (54,8 %). Однако, высокая степень гидролиза приводит к увеличению / накоплению в готовом продукте свободных аминокислот и низкомолекулярных пептидов со среднечисловой молекулярной массой 10 кДа, что снижает органолептические показатели, а именно ухудшается вкус – появляется горечь. Кроме того, Алкалаза 2,4 L FG – самый дорогой фермент из изученных / рассмотренных в данной работе, что при использовании на производстве увеличит себестоимость готового продукта. Ферменты Панкреатин и Протозим В обеспечивают высокую степень гидролиза белка: 26,8 % – для Панкреатина и 17,7 % – для Протозима В, а также высокий выход готового продукта – 49,1 и 33,8 %; гидролизаты характеризуются высоким аминокислотным составом практически по всем незаменимым аминокислотам (табл. 1). Поэтому дальнейшие исследования в работе выполнены с ферментативными препаратами Панкреатином и Протозимом В.

Влияние концентрации ферментного препарата.

Следующий этап исследования – изучение влияния концентрации ферментативного препарата на свойства полученных рыбных белковых гидролизатов. В качестве ферментного препарата использовали Панкреатин. Результаты представлены в таблице 2 и на рисунке 3.

Изменение концентрации Панкреатина не оказывает заметного влияния на количество общего азота (N_{TN} , %) и, соответственно, содержание белка в гидролизате. Повышение концентрации ферментного препарата с 1 до 3 г/кг сырья приводило к увеличению степени гидролиза на 5 %, выход продукта при этом увеличивался более чем на 7 %. Также было показано [38], что тип фермента (Алкалаза, Новозим или Протеаза), соотношение фермента и субстрата, температура гидролиза и время влияют на степень гидролиза, анти-

Таблица 1. Характеристика белоксодержащего сырья и рыбных белковых гидролизатов, полученных под действием различных ферментных препаратов ($C_{\text{ФП}} = 1$ г/кг сырья)

Table 1. Protein-containing raw materials and enzymatic fish protein hydrolysates obtained from various enzymes, CE = 1 g/kg raw materials

Показатели	Мышечная ткань трески	Белок- содержащее сырье	Ферментный препарат					Идеальный белок*, г/100 г белка	AAS**, %
			Энзи- Микс У	Коллагеназа	Протозим В	Панкреатин	Алкалаза 2,4 L FG		
рН водного раствора	–	–	6,1 ± 0,1	7,3 ± 0,1	7,1 ± 0,1	6,9 ± 0,1	6,7 ± 0,1	–	–
Влажность, %	80,6 ± 0,5	75,9 ± 0,1	4,5 ± 0,1	9,0 ± 0,2	5,1 ± 0,2	8,8 ± 0,1	9,0 ± 0,2	–	–
Аминный азот, $N_{\text{АН}}$, %	–	–	2,3 ± 0,1	1,3 ± 0,1	2,5 ± 0,1	3,7 ± 0,1	4,3 ± 0,2	–	–
Общий азот, $N_{\text{ТН}}$, %	–	–	13,6 ± 0,2	13,3 ± 0,2	14,1 ± 0,2	13,8 ± 0,2	13,7 ± 0,1	–	–
Белок, %	18,1 ± 1,0	10,9 ± 0,4	85,0 ± 0,8	83,1 ± 0,8	88,1 ± 0,8	86,3 ± 0,8	85,6 ± 0,5	–	–
Зола, %	1,4 ± 0,1	12,5 ± 0,4	10,5 ± 0,4	7,9 ± 0,3	6,8 ± 0,4	4,9 ± 0,4	5,4 ± 0,2	–	–
M_w , кДа	–	–	63,6 ± 2,0	62,5 ± 1,5	30,0 ± 1,1	18,1 ± 0,9	10,1 ± 0,8	–	–
Степень гидролиза, %	–	–	16,9 ± 0,5	9,8 ± 0,3	17,7 ± 0,5	26,8 ± 0,4	31,4 ± 0,4	–	–
Выход, %	–	–	22,8 ± 0,5	25,8 ± 0,5	33,8 ± 0,5	49,1 ± 0,5	54,8 ± 0,5	–	–
Незаменимые аминокислоты, г/100 г белка, в т. ч.:	46,7 ± 1,7	34,9 ± 1,8	27,3 ± 1,6	38,0 ± 1,3	39,1 ± 1,6	38,0 ± 1,3	39,9 ± 1,3	27,1 ± 1,1	–
Треонин*	4,1 ± 0,3	3,6 ± 0,5	2,6 ± 0,3	3,0 ± 0,3	3,3 ± 0,4	4,1 ± 0,4	3,2 ± 0,3	2,3 ± 0,2	178
Валин*	5,1 ± 0,5	3,7 ± 0,7	2,6 ± 0,4	3,6 ± 0,4	4,0 ± 0,4	4,4 ± 0,4	4,1 ± 0,4	3,9 ± 0,4	113
Метионин*	2,8 ± 0,6	2,9 ± 0,4	2,3 ± 0,6	2,9 ± 0,2	2,8 ± 0,3	1,4 ± 0,2	2,9 ± 0,3	2,2 ± 0,2	82
Цистеин*	1,1 ± 0,4	0,9 ± 0,3	0,7 ± 0,2	0,4 ± 0,1	0,9 ± 0,2	0,4 ± 0,1	0,9 ± 0,2		
Изолейцин*	4,1 ± 0,5	3,2 ± 0,5	2,0 ± 0,3	3,1 ± 0,3	3,3 ± 0,4	4,0 ± 0,4	3,6 ± 0,3	3,0 ± 0,3	133
Лейцин*	7,8 ± 0,8	6,3 ± 0,7	5,0 ± 0,8	7,3 ± 0,6	8,2 ± 0,7	7,5 ± 0,6	8,2 ± 0,8	5,9 ± 0,6	127
Тирозин*	3,2 ± 0,3	2,4 ± 0,4	1,9 ± 0,5	3,4 ± 0,2	2,0 ± 0,3	3,3 ± 0,3	3,3 ± 0,4	3,8 ± 0,4	192
Фенилаланин*	3,4 ± 0,5	3,4 ± 0,7	2,1 ± 0,5	3,3 ± 0,3	2,7 ± 0,4	4,0 ± 0,4	2,8 ± 0,3		
Лизин*	10,8 ± 0,7	6,5 ± 0,8	5,5 ± 0,7	7,6 ± 0,7	8,4 ± 0,8	8,2 ± 0,7	7,4 ± 0,6	4,5 ± 0,4	182
Гистидин*	4,3 ± 0,6	2,0 ± 0,4	2,6 ± 0,6	3,4 ± 0,6	3,5 ± 0,7	0,7 ± 0,2	3,5 ± 0,2	1,5 ± 0,2	47
Заменимые аминокислоты, г/100 г белка, в т. ч.:	48,4 ± 1,6	64,8 ± 1,8	73,8 ± 1,8	66,0 ± 1,9	63,1 ± 1,9	66,3 ± 1,8	57,2 ± 1,7	–	–
Аспарагиновая кислота	9,3 ± 0,8	8,0 ± 0,7	9,3 ± 0,8	10,3 ± 0,9	10,7 ± 0,9	9,0 ± 0,9	10,4 ± 0,9	–	–
Серин	4,0 ± 0,4	5,3 ± 0,5	4,6 ± 0,5	4,2 ± 0,4	4,0 ± 0,4	5,5 ± 0,5	3,5 ± 0,3	–	–
Глутаминовая кислота	15,1 ± 0,9	12,0 ± 0,8	15,7 ± 0,9	17,8 ± 0,9	18,9 ± 1,1	14,0 ± 0,9	16,8 ± 1,1	–	–
Глицин	4,1 ± 0,3	16,3 ± 0,9	27,9 ± 0,8	19,4 ± 1,1	16,5 ± 0,9	14,5 ± 1,1	14,2 ± 0,9	–	–
Аланин	5,8 ± 0,6	8,5 ± 0,8	9,7 ± 0,7	8,5 ± 0,8	7,9 ± 0,8	8,8 ± 0,8	7,3 ± 0,7	–	–
Аргинин	6,0 ± 0,6	8,7 ± 0,7	2,9 ± 0,3	3,0 ± 0,3	2,7 ± 0,3	9,3 ± 0,7	2,3 ± 0,3	–	–
Пролин	4,1 ± 0,4	6,0 ± 0,5	3,7 ± 0,4	2,8 ± 0,3	2,4 ± 0,2	5,2 ± 0,4	2,7 ± 0,3	–	–

Примечание: * – данные из [35]; ** – AAS (аминокислотный скор) рассчитан для рыбного белкового гидролизата с Панкреатином.

Note: * – according to [35]; ** – amino acid score (AAS) was calculated for fish protein hydrolysates obtained from Pancreatin.

окислительную активность и другие связанные физико-химические свойства белковых гидролизатов.

Содержание незаменимых аминокислот в белковых гидролизатах, полученных с использованием ферментного препарата Панкреатина, значительно превышает аналогичные показатели в идеальном белке. Аминокислотный скор превышает 100 % для всех незаменимых аминокислот (кроме гистидина).

Молекулярно-массовое распределение полученных гидролизатов представлено на рисунке 3. Независимо от концентрации ферментного препарата на хро-

матограммах регистрируется три пика: первый соответствует белковым фракциям с молекулярной массой около 50–60 кДа, второй – 20–30 кДа, третий – менее 15 кДа. При увеличении концентрации ферментного препарата Панкреатина наблюдается небольшое смещение пиков в область низких значений средне-массовых молекулярных масс гидролизатов. Гидролизат, полученный при $C_{\text{ФП}} = 1$ г/кг сырья, имеет более широкое молекулярно-массовое распределение. Среднемассовая молекулярная масса, рассчитанная по правилу аддитивности, составила 18,1 кДа –

Таблица 2. Характеристика рыбных белковых гидролизатов, полученных с использованием Панкреатина различных концентраций

Table 2. Fish protein hydrolysates obtained from different concentrations of Pancreatin

Показатели	Концентрация Панкреатина, г/кг сырья				Идеальный белок*, г/100 г белка	AAS**, %
	1	3	6	12		
рН водного раствора	6,9 ± 0,1	9,6 ± 0,2	6,5 ± 0,1	6,4 ± 0,1	–	–
Влажность, %	9,5 ± 0,1	9,6 ± 0,2	9,8 ± 0,2	9,5 ± 0,4	–	–
Аминный азот, N_{AN} , %	3,7 ± 0,1	4,3 ± 0,1	4,4 ± 0,1	4,6 ± 0,1	–	–
Общий азот, N_{TN} , %	13,8 ± 0,2	13,5 ± 0,2	13,9 ± 0,2	13,6 ± 0,2	–	–
Белок, %	86,3 ± 0,8	84,4 ± 0,5	86,8 ± 0,5	85,0 ± 0,5	–	–
Зола, %	4,5 ± 0,4	5,9 ± 0,3	3,4 ± 0,3	5,3 ± 0,2	–	–
M_w , кДа	18,1 ± 0,6	16,7 ± 0,9	16,4 ± 0,7	12,6 ± 0,8	–	–
Степень гидролиза, %	26,8 ± 0,4	31,8 ± 0,6	31,6 ± 0,8	33,8 ± 0,6	–	–
Выход, %	49,1 ± 0,8	56,8 ± 0,9	56,5 ± 1,0	56,0 ± 1,5	–	–
Незаменимые аминокислоты, г/100 г белка, в т. ч.:	38,0 ± 1,3	36,5 ± 1,2	35,6 ± 1,4	44,2 ± 1,5	–	–
Треонин*	4,1 ± 0,4	3,9 ± 0,3	4,0 ± 0,4	4,6 ± 0,5	2,3	200
Валин*	4,4 ± 0,4	4,4 ± 0,3	4,6 ± 0,4	5,2 ± 0,4	3,9	133
Метионин*	1,4 ± 0,2	1,3 ± 0,3	1,2 ± 0,3	2,6 ± 0,3	2,2	136
Цистеин*	0,4 ± 0,1	0,4 ± 0,1	0,4 ± 0,2	0,4 ± 0,3		
Изолейцин*	4,0 ± 0,4	4,1 ± 0,5	3,8 ± 0,5	4,6 ± 0,4	3,0	153
Лейцин*	7,5 ± 0,6	7,5 ± 0,7	7,1 ± 0,6	8,7 ± 0,5	5,9	147
Тирозин*	3,3 ± 0,3	2,2 ± 0,2	3,2 ± 0,3	3,9 ± 0,3	3,8	216
Фенилаланин*	4,0 ± 0,4	3,5 ± 0,3	4,0 ± 0,5	4,3 ± 0,4		
Лизин*	8,2 ± 0,7	7,8 ± 0,6	6,7 ± 0,5	9,2 ± 0,6	4,5	204
Гистидин*	0,7 ± 0,2	2,1 ± 0,3	0,6 ± 0,2	0,7 ± 0,1	1,5	47
Заменимые аминокислоты, г/100 г белка, в т. ч.:	66,3 ± 1,8	64,5 ± 1,7	67,0 ± 1,8	67,3 ± 1,9	–	–
Аспарагиновая кислота	9,0 ± 0,9	8,2 ± 0,7	8,8 ± 0,9	9,8 ± 0,8	–	–
Серин	5,5 ± 0,5	5,3 ± 0,4	5,7 ± 0,4	5,8 ± 0,5	–	–
Глутаминовая кислота	14,0 ± 0,9	12,9 ± 0,8	12,8 ± 1,0	15,6 ± 1,1	–	–
Глицин	14,5 ± 1,1	13,7 ± 0,9	16,5 ± 1,1	12,8 ± 1,2	–	–
Аланин	8,8 ± 0,8	8,3 ± 0,7	8,8 ± 0,7	8,2 ± 0,9	–	–
Гистидин	9,3 ± 0,7	2,1 ± 0,3	0,6 ± 0,1	0,7 ± 0,2	–	–
Аргинин	5,2 ± 0,4	9,0 ± 0,8	8,9 ± 0,7	9,5 ± 0,8	–	–

Примечание: * – данные из [35]; ** – AAS (аминокислотный скор) рассчитан для гидролизата, полученного при $C_{\text{ФП}} = 12$ г/кг сырья.

Note: * – according to [35]; ** – amino acid score (AAS) was calculated for fish protein hydrolysates obtained at CE = 12 g/kg raw material.

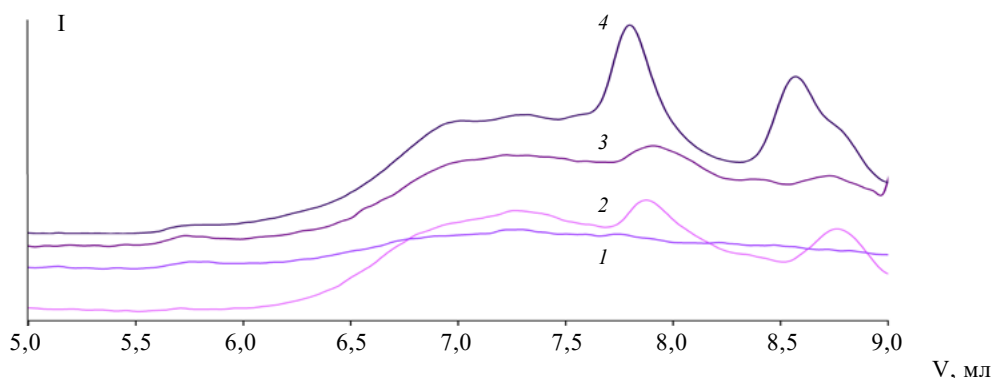


Рисунок 3. Хроматограммы для расчета молекулярно-массового распределения ферментативных белковых гидролизатов, полученные методом ВЭЖХ. Концентрации Панкреатина, г/кг сырья:

1 – 1; 2 – 2-3; 3 – 3-6; 4 – 4-12

Figure 3. Molecular weight distribution of enzymatic protein hydrolysates obtained by HPLC; enzymatic hydrolysates were obtained using different concentrations of Pancreatin, g/kg raw materials: 1 – 1; 2 – 2-3; 3 – 3-6; and 4 – 4-12

при ферментализации с $C_{\text{ФП}} = 1$ г/1 кг сырья; 16,7 кДа – при $C_{\text{ФП}} = 3$ г/1 кг сырья; 16,4 кДа – при $C_{\text{ФП}} = 6$ г/1 кг сырья и 12,6 кДа – при $C_{\text{ФП}} = 12$ г/1 кг сырья.

Предварительная кислотная обработка белоксодержащего сырья. Образцы ферментативного рыбного белкового гидролизата, полученные в соответствии с технологической схемой, представленной на рисунке 1, имели рыбных запахов; для некоторых образцов он выражен незначительно. Это не является препятствием для использования их в капсулированном виде в качестве, например, компонента пищевых добавок. Однако при использовании рыбных белковых гидролизатов в составе пищевых систем (некапсулированных) возникает необходимость улучшения органолептических показателей (цвет, запах, вкус) и снижения количества минеральных солей, что позволит повысить качество и чистоту конечного продукта.

С целью улучшения органолептических свойств рыбных белковых гидролизатов в технологическую схему ввели дополнительную стадию – обработку сырья раствором уксусной кислоты (рис. 4). Обработка фарша органическими кислотами способствует удалению остатков крови, тканевого сока и небелковых азотистых летучих оснований, которые влияют на цвет и запах (органолептические свойства) продуктов из рыбы.

Обработку сырья проводили 0,35 М раствором уксусной кислоты при температурах 20–25 °С в течение 1 ч, массовое соотношение сырье:раствор кислоты 1:3. После обработки фарш промывали холодной водопроводной водой для удаления кислоты, значение pH промывных вод – не менее 5,0 (3–4 промывки). Характеристика гидролизатов, полученных с предварительной обработкой сырья раствором уксусной кислоты, представлена в таблице 3.

Введение кислотной обработки не повлияло на содержание белка в гидролизатах, содержание золы в образцах уменьшилось при использовании щелочных протеиназ. При использовании кислой Протеиназы (Энзи-Микс У) количество золы увеличилось вследствие введения дополнительной стадии нейтрализации для доведения pH готового продукта до нейтральных значений. Выход гидролизата снизился, что связано с потерей массы сырья на стадии кислотной обработки до 35–40 % от массы исходного сырья (табл. 1 и 3).

Для увеличения степени растворения белков проведена оптимизация стадии щелочного растворения белковых молекул. Результаты показали, что обязательным условием растворения белоксодержащего сырья является создание высокого гидромодуля реакционной среды (массовое соотношение вода:сырье не менее 4:1), что приводит к уменьшению концентрации



Рисунок 4. Технологическая схема получения белкового гидролизата, включающая стадию обработки сырья раствором уксусной кислоты

Figure 4. Technological scheme for producing protein hydrolysate, including the stage of processing raw materials with an acetic acid solution

Таблица 3. Характеристика рыбных белковых гидролизатов, полученных с предварительной кислотной обработкой сырья (концентрация уксусной кислоты 0,35 М) и с использованием разных ферментных препаратов ($C_{\text{ФП}} = 2$ г/кг сырья)

Table 3. Fish protein hydrolysate obtained with preliminary acid treatment (acetic acid, $C = 0.35$ M) and using various enzymes, $CE = 2$ g/kg raw materials

Показатели	Ферментный препарат			
	Энзи-Микс У	Протозим В	Панкреатин	Алкалаза 2,4 L FG
рН водного раствора	$6,1 \pm 0,2$	$6,9 \pm 0,1$	$6,7 \pm 0,1$	$6,5 \pm 0,2$
Влажность, %	$7,7 \pm 0,2$	$4,8 \pm 0,4$	$7,3 \pm 0,2$	$4,2 \pm 0,5$
Аминный азот, N_{AN} , %	$1,4 \pm 0,1$	$1,5 \pm 0,1$	$2,1 \pm 0,1$	$2,2 \pm 0,1$
Общий азот, N_{TN} , %	$13,6 \pm 0,2$	$14,6 \pm 0,1$	$14,4 \pm 0,2$	$14,8 \pm 0,1$
Белок, %	$85,0 \pm 1,2$	$91,5 \pm 0,4$	$89,8 \pm 1,0$	$92,6 \pm 0,6$
Зола, %	$7,3 \pm 0,2$	$3,7 \pm 0,1$	$2,9 \pm 0,1$	$3,2 \pm 0,1$
Степень гидролиза, %	$10,3 \pm 0,6$	$10,3 \pm 0,7$	$14,6 \pm 0,5$	$14,9 \pm 0,6$
Выход, %	$17,2 \pm 0,4$	$30,8 \pm 0,6$	$35,6 \pm 0,5$	$38,8 \pm 0,8$
Органолептические характеристики*:				
Цвет (сухие РБГ)	белый	бежевый	светло-желтый	светло-желтый
Запах (раствор РБГ, $C = 4$ %)	уксусной кислоты	отсутствует	рыбный	слабый рыбный
Вкус (раствор РБГ, $C = 4$ %)	кислый	горькое послевкусие	рыбный, горькое послевкусие	рыбный, горький

белковых веществ в конечном продукте и необходимости введения дополнительной стадии перед процессом сушки – упаривание гидролизата. В качестве альтернативы концентрирование замораживанием можно рассматривать как наилучший вариант для сохранения гидролизатов рыбного белка, повышения их стабильности и сохранения их питательных и биологически активных свойств [39].

Химический анализ показал, что гидролизаты, полученные под действием ферментных препаратов: Панкреатина, Алкалазы 2,4 L FG и Протозима В, содержат более 90 % белковых веществ, наличие минеральных веществ не превышает 5 %; такие гидролизаты могут быть использованы в составе пищевых композиций. По органолептическим показателям для использования в пищевых системах подходит только гидролизат, полученный под действием фермента Протозима В. Для удаления горьковатого послевкусия можно снизить степень гидролиза, т. е. либо уменьшить концентрацию ферментного препарата, либо сократить продолжительность ферментализации.

Влияние концентрации Протозима и времени ферментализации на свойства рыбных белковых гидролизатов. С увеличением степени гидролиза в продукте накапливаются свободные аминокислоты, которые имеют горький вкус; это снижает качество гидролизатов как компонентов пищевых систем. Однако уменьшение степени гидролиза приводит к снижению выхода гидролизата и, соответственно, рентабельности производства. Поскольку концентрация ферментного препарата ($C_{\text{ФП}}$, г/кг сырья) и продолжительность гидролиза (τ , ч) связаны между собой, то при поиске оптимальных условий процесса ферментализации мы варьировали эти параметры. Полученные ферментативные

белковые гидролизаты представляли собой однородные мелкодисперсные порошки светло-бежевого или светло-желтого цвета, хорошо растворимые в воде. Молекулярно-массовое распределение полученных образцов рыбных белковых гидролизатов приведено на рисунке 5, характеристики полученных образцов в таблице 4.

Рыбные белковые гидролизаты, полученные при концентрации ферментного препарата Протозима 2, 4 и 8 г/кг сырья, имеют среднемассовую молекулярную массу (M_w) 42,9; 30,4 и 22,8 кДа соответственно (рис. 5). Отдельные фракции с разной молекулярной массой можно получить путем фракционирования с использованием полимерных спирально-навитых ультрафильтрационных мембран, как показано в работе [40]. При увеличении концентрации ферментного препарата снижается молекулярная масса конечного продукта, а выход продукта, напротив, увеличивается на 12 % (с 31,2 до 43,2 %) (табл. 4). Образцы содержат около 90 % белковых веществ, а количество минеральных веществ не превышает 4 %.

Образцы гидролизатов, полученные с использованием Протозима В разных концентраций от 1 до 8 г/кг сырья с предварительной кислотной обработкой белоксодержащего сырья, характеризуются отсутствием постороннего запаха. При использовании высоких концентраций ферментного препарата, превышающих 1,5 г/кг сырья, раствор гидролизата характеризуется слабой горечью на вкус или имеет горькое послевкусие. При использовании концентрации Протозима В 1,0 и 1,5 г/кг сырья растворы полученных гидролизатов не имеют постороннего вкуса. По своим органолептическим показателям они могут быть использованы в составе пищевых композиций.

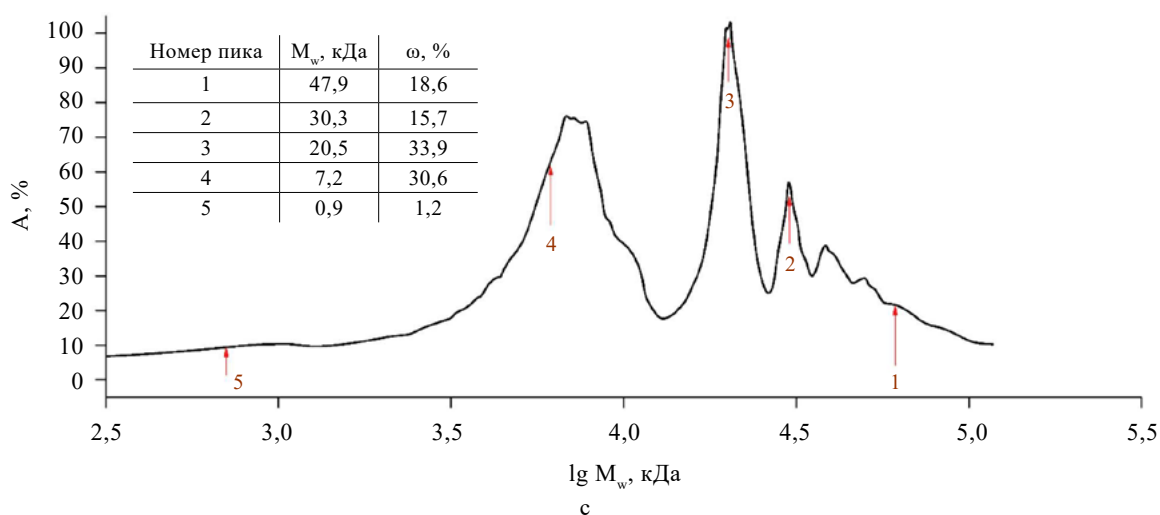
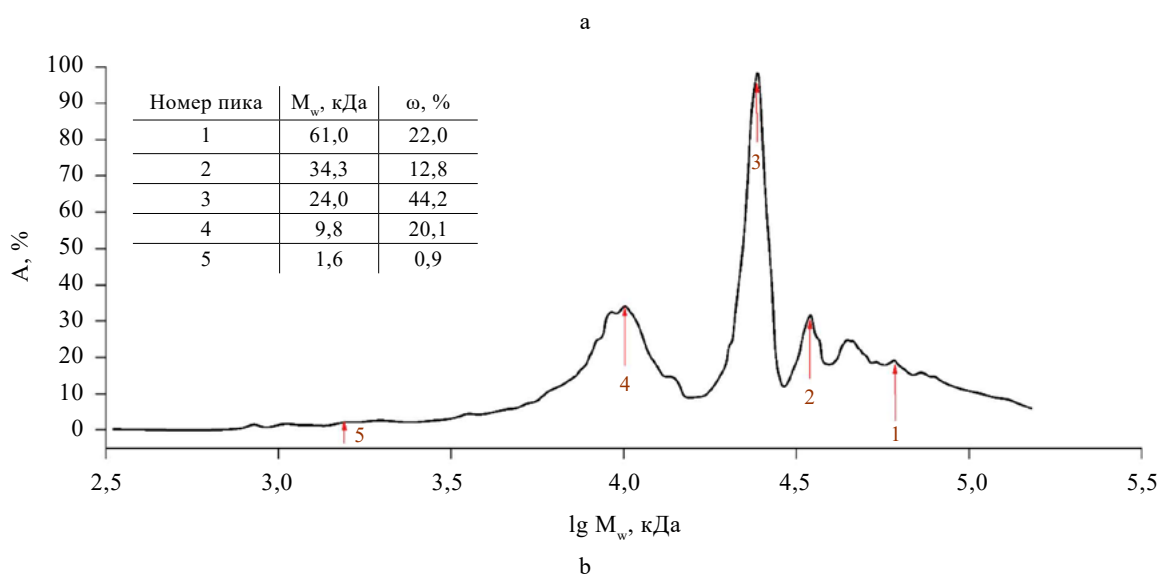
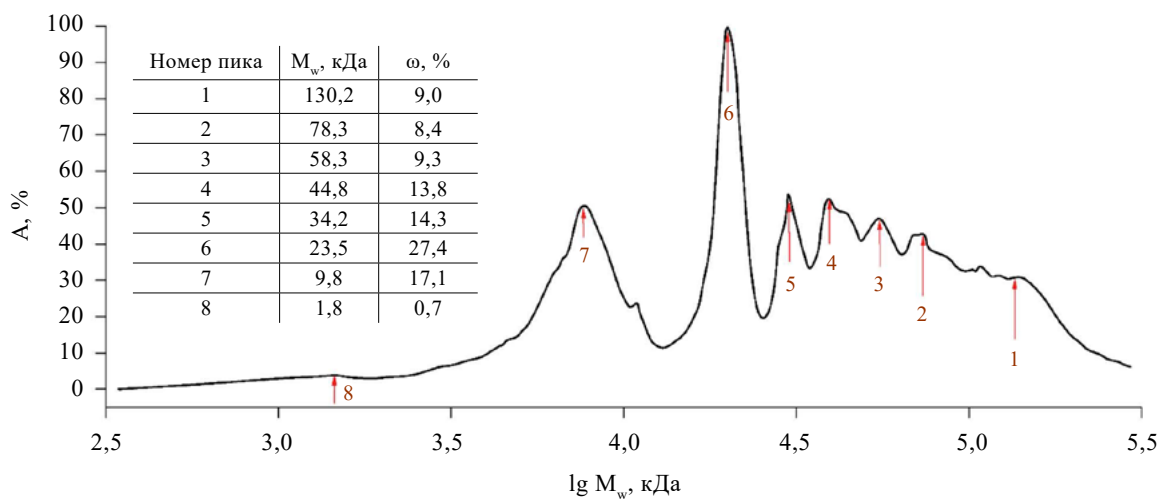


Рисунок 5. Молекулярно-массовое распределение белковых гидролизатов, полученных по технологической схеме с предварительной обработкой сырья уксусной кислотой (рис. 4). Условия ферментализации: $t = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\tau = 4\text{ ч}$, концентрация ферментного препарата Протозима В, г/кг сырья: а – 2; б – 4; с – 8.

Использован метод гель-проникающей хроматографии

Figure 5. Molecular weight distribution of protein hydrolysates obtained by acetic acid pre-treatment (Fig. 4). Fermentolysis conditions: $t = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\tau = 4\text{ h}$, enzyme Protozyme В, g/kg raw materials: а – 2; б – 4; and с – 8. Gel permeation chromatography

Таблица 4. Влияние концентрации фермента и времени ферментализации на свойства рыбных белковых гидролизатов, полученных с предварительной обработкой сырья (Ферментный препарат – Протозим)

Table 4. Effect of enzyme concentration and fermentolysis time on fish protein hydrolysates obtained by acetic acid pre-treatment (Protozyme)

Показатели	Условия ферментализа									
	Концентрация ферментного препарата, г/кг сырья									
	1		1,05		2			4	8	
	55 °С, 3 ч	60 °С, 3 ч	55 °С, 2 ч	55 °С, 3 ч	55 °С, 1 ч	55 °С, 2 ч	60 °С, 4 ч	60 °С, 4 ч	60 °С, 4 ч	
Влажность, %	6,5 ± 0,1	6,1 ± 0,2	6,2 ± 0,1	5,9 ± 0,4	5,3 ± 0,5	6,3 ± 0,2	6,3 ± 0,2	6,4 ± 0,1	6,8 ± 0,1	
Общий азот, N_{TN} , %	14,4 ± 0,2	14,4 ± 0,2	14,5 ± 0,1	14,5 ± 0,1	14,6 ± 0,1	14,4 ± 0,2	14,5 ± 0,1	14,4 ± 0,2	14,4 ± 0,2	
Белок, %	90,0 ± 1,1	90,0 ± 1,1	90,6 ± 0,6	90,6 ± 0,6	91,2 ± 0,6	90,0 ± 1,1	90,6 ± 0,6	90,0 ± 1,1	90,0 ± 1,1	
Аминный азот, N_{AN} , %	1,2 ± 0,1	1,3 ± 0,1	1,3 ± 0,1	1,4 ± 0,1	1,2 ± 0,1	1,4 ± 0,1	2,2 ± 0,1	2,6 ± 0,1	2,8 ± 0,1	
Зола, %	3,5 ± 0,1	3,9 ± 0,1	3,2 ± 0,1	3,5 ± 0,1	3,5 ± 0,1	3,7 ± 0,1	3,1 ± 0,1	3,6 ± 0,1	3,2 ± 0,1	
pН водного раствора	6,9 ± 0,1	6,7 ± 0,2	6,8 ± 0,1	6,6 ± 0,2	7,0 ± 0,1	6,6 ± 0,1	6,5 ± 0,1	6,4 ± 0,1	6,5 ± 0,1	
Степень гидролиза, %	8,3 ± 0,6	9,0 ± 0,6	8,9 ± 0,6	9,6 ± 0,6	8,2 ± 0,6	9,7 ± 0,5	15,2 ± 0,5	18,0 ± 0,4	19,4 ± 0,4	
Выход, %	22,0 ± 0,4	22,8 ± 0,5	20,4 ± 0,5	24,0 ± 0,6	18,8 ± 0,4	32,4 ± 0,8	31,2 ± 0,6	39,2 ± 0,8	43,2 ± 0,8	
M_w , кДа	—	—	—	—	—	—	42,9	30,4	22,8	
Органолептические показатели (раствор РБГ, C = 4%):										
Вкус	без постороннего вкуса			слабая горечь (послевкусие)	слабая горечь		горький вкус			
Запах	без постороннего запаха			без постороннего запаха			без постороннего запаха			

Выводы

В ходе проведенного исследования подобраны условия получения рыбных белковых гидролизатов из отходов переработки атлантической трески с учетом особенностей белоксодержащего сырья. Использован метод ферментативного гидролиза в широком диапазоне концентраций ферментных препаратов – Панкреатина, Коллагеназы, Протозима В, Алкалазы 2,4 L FG, Энзи-Микса У. Получены образцы рыбных белковых гидролизатов с высоким содержанием белка 85–90 %; выход варьировался в диапазоне от 22 до 55 % от массы высушенного сырья (содержание влаги в сырье не превышало 10 %). Анализ аминокислотного состава показал, что гидролизаты содержат все незаменимые аминокислоты и характеризуются высоким аминокислотным скором практически по всем незаменимым аминокислотам. Для получения белковых гидролизатов микробиологического назначения наиболее подходят ферментные препараты Панкреатин и Алкалаза 2,4 L FG: достигается высокая степень гидролиза (более 26 %) и высокий выход продукта.

Повышена эффективность традиционной технологии получения рыбных белковых гидролизатов пищевого назначения. Введена дополнительная стадия обработки белоксодержащего сырья раствором уксусной кислоты с целью улучшения органолептических показателей (цвет, запах, вкус) конечного продукта. Для дополнительной стадии требовалось минимальное количество

промывок, а обработанное сырье характеризовалось высоким содержанием белковых веществ.

С целью увеличения степени растворения белков проведена оптимизация стадии щелочного растворения белковых молекул. Обосновано создание высокого гидро модуля реакционной среды (массовое соотношение вода:сырье не менее 4:1) в качестве обязательного условия растворения рыбных белков используемого сырья.

При исследовании влияния концентрации ферментного препарата установлено, что с повышением концентрации с 1 до 8 г/кг сырья выход белкового гидролизата и степень гидролиза белка увеличиваются. Однако при этом повышается количество низкомолекулярных пептидов, что приводит к снижению органолептических характеристик продукта – появляется горьковатый привкус и усиливается рыбный запах. Исследования влияния типа ферментного препарата показали, что для получения пищевых белковых гидролизатов подходит только Протозим В. При этом концентрация фермента Протозима В, равная 1,5 г/кг сырья, и время гидролиза 2 ч являются оптимальными для получения рыбного белкового гидролизата пищевого назначения (со степенью гидролиза 8,9 %) с высокими органолептическими характеристиками. Белковые гидролизаты со степенью гидролиза более 10 % также могут быть использованы в составе пищевых продуктов, но только в капсулированном виде.

Критерии авторства

Ю. А. Кучина и Д. С. Колотова – концептуализация исследования, проведение экспериментальных исследований, обработка результатов. В. В. Толстиков и В. В. Василевич – методология. С. Р. Деркач – концептуализация исследования, подготовка и написание статьи. Все авторы ознакомились и согласились с опубликованной версией рукописи.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарности

Авторы выражают благодарность коллективу кафедры химии и лаборатории химии и технологии морских биоресурсов (лаборатория образована при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, соглашение № 075-03-2024-024/1) Мурманского арктического университета за техническую поддержку.

Авторы выражают благодарность коллективу ООО «Эко Фиш» за поддержку и предоставление исходного сырья для проведения научных экспериментов.

Contribution

Yu.A. Kuchina and D.S. Kolotova developed the research concept, conducted the experimental research, and processed the results. V.V. Tolstikov and V.V. Vasilevich designed the research methodology. S.R. Derkach developed the research concept and drafted the manuscript. All the authors approved of 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.

Acknowledgments

The authors are grateful to the staff of the Department of Chemistry and the Laboratory of Chemistry and Technology of Marine Bioresources, Murmansk Arctic University, for technical support (Russian Ministry of Science and Higher Education, Agreement No. 075-03-2024-024/1).

The authors express their gratitude to Eko Fish Ltd for support and provision of raw materials for scientific experiments.

Список литературы / References

1. Югай А. В. Актуальность использования рыбных белковых гидролизатов в технологии пищевых продуктов. *Health, Food & Biotechnology*. 2023. Т. 5. № 2. С. 51–66. [Yugay AV. Relevance of the use of fish protein hydrolysates in food technology. *Health, Food & Biotechnology*. 2023;5(2):51–66. (In Russ.)] <https://doi.org/10.36107/hfb.2023.i2.s173>
2. Lu X, Qian S, Wu X, Lan T, Zhang H, *et al*. Research progress of protein complex systems and their application in food: A review. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2024;265(Part 2):130987. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.130987>
3. Ramakrishnan SR, Jeong C-R, Park J-W, Cho S-S, Kim S-J. A review on the processing of functional proteins or peptides derived from fish by-products and their industrial applications. *Heliyon*. 2023;9(3):e14188. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e14188>
4. Honrado A, Miguel M, Ardila P, Beltrán JA, Calanche JB. From waste to value: Fish protein hydrolysates as a technological and functional ingredient in human nutrition. *Foods*. 2024;13(19):3120. <https://doi.org/10.3390/foods13193120>
5. Соколов А. В. Современное состояние и тенденции развития рыбохозяйственного комплекса России. *Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания*. 2019. № 4. С. 36–48. [Sokolov AV. Current state and development trends of the Russian fisheries sector. *Technologies for the food and processing industry of aic – Healthy food*. 2019;(4):36–48. (In Russ.)] <https://doi.org/10.24411/2311-6447-2019-10021>
6. Zhao H, Wang M, Peng X, Zhong L, Liu X, *et al*. Fish consumption in multiple health outcomes: An umbrella review of meta-analyses of observational and clinical studies. *Annals of Translational Medicine*. 2023;11(3):152. <https://dx.doi.org/10.21037/atm-22-6515>
7. Zamora-Sillero J, Gharsallaoui A, Prentice C. Peptides from fish by-product protein hydrolysates and its functional properties: An overview. *Marine Biotechnology*. 2018;20(2):118–130. <https://doi.org/10.1007/s10126-018-9799-3>
8. Rafieezadeh D, Esfandyari G. Marine bioactive peptides with anticancer potential, a narrative review. *International Journal of Biochemistry and Molecular Biology*. 2024;15(4):118–126. <https://doi.org/10.62347/TUVQ7468>
9. Ishak NH, Sarbon NM. A review of protein hydrolysates and bioactive peptides deriving from wastes generated by fish processing. *Food and Bioprocess Technology*. 2018;11(11):2–16. <https://doi.org/10.1007/s11947-017-1940-1>
10. Idowu AT, Igiehon OO, Idowu S, Olatunde OO, Benjakul S. Bioactivity potentials and general applications of fish protein hydrolysates. *International Journal of Peptide Research and Therapeutics*. 2021;27:109–118. <https://doi.org/10.1007/s10989-020-10071-1>
11. Nemati M, Shahosseini SR, Ariaii P. Review of fish protein hydrolysates: Production methods, antioxidant and antimicrobial activity and nanoencapsulation. *Food Science and Biotechnology*. 2024;33:1789–1803. <https://doi.org/10.1007/s10068-024-01554-8>

12. Yu Y, Fan F, Wu D, Yu C, Wang Z, et al. Antioxidant and ACE inhibitory activity of enzymatic hydrolysates from *Ruditapes philippinarum*. *Molecules*. 2018;23(5):1189. <http://dx.doi.org/10.3390/molecules23051189>
13. Honrado A, Rubio S, Beltrán JA, Calanche J. Fish by-product valorization as source of bioactive compounds for food enrichment: Characterization, suitability and shelf life. *Foods*. 2022;11(22):3656. <https://doi.org/10.3390/foods11223656>
14. Petrova I, Tolstorebrov I, Zhivlyantseva J, Eikevik TM. Utilization of fish protein hydrolysates as peptones for microbiological culture medias. *Food Bioscience*. 2021;42(5):101063. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fbio.2021.101063>
15. Broli G, Nygaard H, Sletta H, Sandnes K, Aasen IM. Farmed salmon rest raw materials as a source of peptones for industrial fermentation media. *Process Biochemistry*. 2021;102:157–164. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2020.12.004>
16. Horn SJ, Aspmo SI, Eijsink VGH. Growth of *Lactobacillus plantarum* in media containing hydrolysates of fish viscera. *Journal of Applied Microbiology*. 2005;99(5):1082–1089. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2672.2005.02702.x>
17. Hyun J, Rho Y, Nagahawatta DP, Lee G, Lee S, et al. Upcycling fish byproducts for skin health: An enzymatic approach to sustainable nutricosmetics. *Food Bioscience*. 2025;66(11):106205. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fbio.2025.106205>
18. Антипова Л. В., СторуBLEVCEB C. A., Болгова С. Б. Создание коллагеновых продуктов из рыбного сырья. Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2015. Т. 1. № 63. С. 130–133. [Antipova LV, Storublevtsev SA, Bolgova SB. Creation of collagen products fish raw material. Proceedings of the Voronezh state university of engineering technologies. 2015;1(63):130–133. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/TTUFGP>
19. Ribeiro TB, Maia MRG, Fonseca AJM, Marques B, Caleja C, et al. A comprehensive review of fish protein hydrolysates targeting pet food formulations. *Food Reviews International*. 2024;41(5):1321–1359. <https://doi.org/10.1080/87559129.2024.2430660>
20. Gao R, Yu Q, Shen Y, Chu Q, Chen G, et al. Production, bioactive properties, and potential applications of fish protein hydrolysates: Developments and challenges. *Trends in Food Science & Technology*. 2021;110:687–699. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.02.031>
21. Shahidi F, Varatharajan V, Peng H, Senadheera R. Utilization of marine by-products for the recovery of value-added products. *Journal of Food Bioactives*. 2019;6:10–61. <https://doi.org/10.31665/JFB.2019.6184>
22. Ozogul F, Cagalj M, Simat V, Ozogul Y, Tkaczewska J, et al. Recent developments in valorisation of bioactive ingredients in discard/seafood processing by-products. *Trends in Food Science & Technology*. 2021;116:559–582. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.08.007>
23. Kaushik N, Falch E, Slizyte R, Kumari A, Khushboo, et al. Valorization of fish processing by-products for protein hydrolysate recovery: Opportunities, challenges and regulatory issues. *Food Chemistry*. 2024;459:140244. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.140244>
24. Хелинг А., Гримм Т., Волков В. В., Мезенова Н. Ю. Исследования различных способов гидролитического процесса вторичного рыбного сырья консервного производства. Вестник Международной академии холода. 2016. № 1. С. 3–8. [Hoeling A, Grimm T, Volkov VV, Mezenova NYu. Hydrolysis process of fish cannery by-products. Journal of International Academy of Refrigeration. 2016;(1):3–8. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/VVRJSX>
25. Мезенова О. Я., Волков В. В., Мерзель Т., Гримм Т., Кюн С., и др. Сравнительная оценка способов гидролиза коллагенсодержащего рыбного сырья при получении пептидов и исследование их аминокислотной сбалансированности. Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2018. Т. 8. № 4. С. 83–94. [Mezenova OYa, Volkov VV, Merzel T, Grimm T, Kyun S, et al. Hydrolysis methods for collagen-containing fish raw materials for obtaining peptides and their amino acid profile. Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology. 2018;8(4):83–94. (In Russ.)] <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2018-8-4-83-94>
26. Yuan Z, Ye X, Hou Z, Chen S. Sustainable utilization of proteins from fish processing by-products: Extraction, biological activities and applications. *Trends in Food Science & Technology*. 2023;143:104276. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2023.104276>
27. 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. [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.)] <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-2-2515>
28. Mazorra-Manzano MA, Ramírez-Suárez JC. Proteolytic enzymes for production of functional protein hydrolysates and bioactive peptides. In: Yada RY, Dee DR, editors. Improving and Tailoring Enzymes for Food Quality and Functionality, 2th ed. UK: Woodhead Publishing; 2024. pp. 325–354. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-15437-9.00013-6>
29. Abdullah FI, Hamid NH, Abd Karim MM, Ismail MF, Sin NLWW, et al. Fish protein hydrolysate for fish health. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*. 2024;60:103292. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2024.103292>
30. Derkach SR, Kolotova DS, Kuchina YuA, Shumskaya NV. Characterization of fish gelatin obtained from Atlantic cod skin using enzymatic treatment. *Polymers*. 2022;14(4):751. <https://doi.org/10.3390/polym14040751>
31. Alp-Erbay E, Yeşilsu AF. Fish protein and its derivatives: Functionality, biotechnology and health effects. *Aquatic Food Studies*. 2021;1(1):AFS13. <https://doi.org/10.4194/AFS13>

32. Бредихина О. В., Зарубин Н. Ю. Разработка комплексной технологии переработки отходов рыбоперерабатывающих предприятий на коллагенсодержащие гидролизаты пищевого назначения. Труды ВНИРО. Технология переработки водных биоресурсов. 2019. Т. 176. С. 109–121. [Bredikhina OV, Zarubin NYu. Development of complex technology of processing of organic waste of fish processing enterprises on collagencontaining hydrolysates for food purposes. Trudy VNIRO. Aquatic bioresources processing technologies. 2019;176:109–121. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/QADCUA>
33. Association of Official Analytical Chemist AOAC. Official Methods of Analysis, 20th ed. NY: AOAC International; 2016.
34. Dinakarkumar Yu, Krishnamoorthy S, Margavelu G, Ramakrishnan G, Chandran M. Production and characterization of fish protein hydrolysate: Effective utilization of trawl by-catch. Food Chemistry Advances. 2022;1:100138. <https://doi.org/10.1016/j.focha.2022.100138>
35. Coles GD, Wratten SD, Porter JR. Food and nutritional security require adequate protein as well as energy, delivered from whole-year crop production. Peer J. 2016;4(6245):e2100. <http://dx.doi.org/10.7717/peerj.2100>
36. Verdú S, Fuentes C, Fuentes A, Pérez AJ, Barat JM, *et al.* Predicting fish by-product proteolysis status by RGB laser-scattering imaging combined with machine learning procedures. Journal of Food Engineering. 2023;358:111660. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2023.111660>
37. Moreira TFM, Pessoa LGA, Seixas FAV, Ineu RP, Gonçalves OH, *et al.* Chemometric evaluation of enzymatic hydrolysis in the production of fish protein hydrolysates with acetylcholinesterase inhibitory activity. Food Chemistry. 2022;367:130728. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130728>
38. Tadesse SA, Emire SA, Barea P, Illera AE, Melgosa R, *et al.* Valorisation of low-valued ray-finned fish (*Labeobarbus nedgia*) by enzymatic hydrolysis to obtain fish-discarded protein hydrolysates as functional foods. Food and Bioproducts Processing. 2023;141:167–184. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2023.08.003>
39. Khan MU, Hamid K, Tolstorebrov I, Eikevik TM. A comprehensive investigation of the use of freeze concentration approaches for the concentration of fish protein hydrolysates. Food Chemistry. 2024;452:139559. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.139559>
40. Chorhirankul N, Janssen AEM, Boom RM. UF fractionation of fish protein hydrolysate. Separation and Purification Technology. 2024;330(Part A):125232. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.125232>

Дополнительная информация об авторах / Additional information about the authors

Кучина Юлия Анатольевна / Yulia A. Kuchina ORCID 0000-0003-3419-1442; eLIBRARY SPIN 3121-3735
Колотова Дарья Сергеевна / Daria S. Kolotova ORCID 0000-0002-1700-2323; eLIBRARY SPIN 3803-6815
Толстиков Владислав Васильевич / Vladislav V. Tolstikov ORCID 0009-0005-0074-0433
Василевич Василий Вадимович / Vasily V. Vasilevich ORCID 0000-0002-5664-5524
Деркач Светлана Ростиславовна / Svetlana R. Derkach ORCID 0000-0002-5871-9320; eLIBRARY SPIN 2263-7685

<https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-1-2619>
<https://elibrary.ru/XDHTZS>

Оригинальная статья
<https://fptt.ru>

Оценка антиоксидантной активности листьев деревьев для дальнейшего использования в качестве экологичных консервантов



Л. Р. Варданян^{1,*}, Н. С. Торосян²,
Н. Р. Оганесян³, Г. О. Торосян^{1,4}

¹ Горисский государственный университет, Горис, Армения

² Центр Эколого-ноосферных исследований НАН РА (Экоцентр ГНКО), Ереван, Армения

³ Национальный политехнический университет Армении, Ереван, Армения

⁴ Научно-технологический центр органической и фармацевтической химии НАН РА, Ереван, Армения

Поступила в редакцию: 29.05.2025

Принята после рецензирования: 13.08.2025

Принята к публикации: 13.01.2026

*e-mail: luizavardanyan211@gmail.com

© Л. Р. Варданян, Н. С. Торосян, Н. Р. Оганесян,

Г. О. Торосян, 2026



Аннотация.

Окислительная порча свежих продуктов питания приводит к значительным экономическим потерям в пищевой промышленности. Активная упаковка с природными антиоксидантами представляет перспективную альтернативу синтетическим консервантам для продления срока хранения и обеспечения безопасности потребителей. Растущие регулятивные ограничения на синтетические антиоксиданты обуславливают необходимость разработки природных аналогов со статусом GRAS. Цель исследования – сравнительная оценка антиоксидантной активности экстрактов листьев древесных пород Республики Армения для применения в технологиях активной упаковки.

Исследованы этилацетатные экстракты листьев *Quercus robur*, *Q. iberica*, *Salix alba* и *Lycium barbarum*, собранных в период полной вегетации на территории Республики Армения. Антиоксидантные свойства оценивали кинетическим методом окисления кумола с одновременным определением суммарного содержания антиоксидантов ($f[InH]$) и константы скорости реакции с пероксидными радикалами (k_r). Метод позволяет провести комплексную характеристику механизмов антиоксидантного действия.

Выход экстрактов варьировался от $3,4 \pm 0,3$ % (*S. alba*) до $6,8 \pm 0,3$ % (*Q. iberica*). Максимальное содержание антиоксидантов установлено для *Q. iberica* ($1,34 \times 10^{-4}$ моль/л). Наибольшую реакционную способность проявил экстракт *S. alba* ($k_r = 1,01 \times 10^5$ л/моль·с). Пересчет в DPPH-эквиваленты показал активность 3,5–13,4 мкг/мл, сопоставимую с зеленым чаем (8–20 мкг/мл) и превосходящую многие фракции розмарина. Отсутствие корреляции между содержанием и активностью антиоксидантов обусловлено структурными различиями фенольных компонентов и их реакционными механизмами.

Экстракты древесных пород Республики Армения демонстрируют высокую антиоксидантную активность при низкой стоимости сырья (5–10 долл./кг против 15–50 долл./кг коммерческих антиоксидантов), что обосновывает их применение как экономически эффективной и экологически устойчивой альтернативы импортным антиоксидантам для пищевой промышленности.

Ключевые слова. Антиоксиданты, консерванты, листья деревьев, экстракты, упаковка, пероксидные радикалы, фенольные соединения, биоактивные вещества, окисление, агроотходы, экологическая устойчивость

Финансирование. Работа финансировалась за счет средств бюджета Горисского государственного университета. Дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

Для цитирования: Варданян Л. Р., Торосян Н. С., Оганесян Н. Р., Торосян Г. О. Оценка антиоксидантной активности листьев деревьев для дальнейшего использования в качестве экологичных консервантов. Техника и технология пищевых производств. 2026. Т. 56. № 1. С. 16–25. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-1-2619>

Tree Leaves as Environmentally Friendly Preservatives: Evaluation of Antioxidant Activity



Luiza R. Vardanyan^{1,*}, Nver S. Torosyan²,
Helli R. Hovhannisyan³, Gagik H. Torosyan^{1,4}

¹ Goris State University, Goris, Armenia

² Center for Ecological and Noosphere Research of the Armenian National Academy of Sciences (Ecocenter SNCO), Yerevan, Armenia

³ National Polytechnic University of Armenia, Yerevan, Armenia

⁴ Scientific and Technological Center for Organic and Pharmaceutical Chemistry of the Armenian National Academy of Sciences, Yerevan, Armenia

Received: 29.05.2025

Revised: 13.08.2025

Accepted: 13.01.2026

*e-mail: luizavardanyan211@gmail.com

© L.R. Vardanyan, N.S. Torosyan, N.R. Hovhannisyan,
G.H. Torosyan, 2026



Abstract.

Oxidative spoilage of fresh food products results in significant economic losses in the food industry. Active packaging with natural antioxidants is a promising alternative to synthetic preservatives: it extends shelf life and provides consumer safety. The growing regulatory restrictions on synthetic antioxidants necessitate the development of natural analogs with GRAS status, i.e., generally recognized as safe. This study compared the antioxidant activities of different leaf extracts from Armenian tree species for active packaging prospects.

Leaves of *Quercus robur*, *Quercus iberica*, *Salix alba*, and *Lycium barbarum* were collected during the full growing season in the Republic of Armenia. Their antioxidant properties were assessed using the kinetic method of cumene oxidation, which involved total antioxidant content ($f[InH]$) and the reaction rate constant with peroxide radicals (k_p). This method provided a comprehensive description of the antioxidant mechanisms. The extract yields ranged from $3.4 \pm 0.3\%$ (*S. alba*) to $6.8 \pm 0.3\%$ (*Q. iberica*). The highest antioxidant content belonged to *Q. iberica* (1.34×10^{-4} mol/L) while the highest reactivity belonged to the *S. alba* extract ($k_p = 1.01 \times 10^5$ L/mol·s). In DPPH equivalents, the antioxidant activity was 3.5–13.4 µg/mL, which was similar to that of green tea (8–20 µg/mL) and superior to rosemary fractions. The lack of correlation between the antioxidant content and the activity was due to the structural differences in the phenolic components and their reaction mechanisms.

The ethyl acetate extracts of Armenian wood species demonstrated high antioxidant activity at a low cost of raw materials (\$5–10/kg vs. \$15–50/kg of commercial antioxidants), which makes them a cost-effective and environmentally sustainable alternative to imported antioxidants.

Keywords. Antioxidants, preservatives, leaves, extracts, packaging, peroxide radicals, phenolic compounds, bioactive compounds, oxidation, agricultural waste, environmental sustainability

Funding. The research was supported entirely from the budget of the Goris State University, Armenia.

For citation: Vardanyan LR, Torosyan NS, Hovhannisyan NR, Torosyan GH. Tree Leaves as Environmentally Friendly Preservatives: Evaluation of Antioxidant Activity. Food Processing: Techniques and Technology. 2026;56(1):16–25. (In Russ.) <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-1-2619>

Введение

Окислительная порча является основной причиной потери качества свежих фруктов и овощей во время хранения и транспортировки. Активные формы кислорода инициируют перекисное окисление липидов, деградацию витаминов и ферментативные реакции потемнения, что приводит к значительным экономическим потерям в пищевой промышленности [1]. Традиционная упаковка обеспечивает лишь пассивную защиту продуктов питания посредством создания барье-

ров для влаги и газообмена, тогда как активная упаковка целенаправленно включает функциональные добавки для непосредственного взаимодействия с газовым пространством над продуктом или его поверхностью. Среди современных технологий активной упаковки особое внимание привлекают полимерные пленки с иммобилизованными антиоксидантами, способные поглощать кислород и нейтрализовать свободные радикалы внутри упаковочного пространства. Применение таких систем может продлить срок годности

скоропортящихся продуктов на 20–40 % по сравнению с традиционными методами упаковки.

Использование растительного сырья в качестве источника природных антиоксидантов представляет значительный научный и практический интерес [2]. Антиоксиданты растительного происхождения характеризуются широким спектром биологической активности, низкой токсичностью, экономической доступностью и возможностью длительного применения без негативных последствий для здоровья потребителей [3, 4]. Эти преимущества особенно важны в контексте растущих требований к безопасности пищевых продуктов и ограничений на использование синтетических добавок.

Синтетические антиоксиданты, включая бутилированный гидрокситолуол [5] и этоксихин [6], демонстрируют высокую эффективность, однако их применение строго регламентируется международными регулирующими органами в связи с потенциальными рисками для здоровья [7]. Таким образом, наблюдается устойчивая тенденция к замещению синтетических антиоксидантов природными аналогами, имеющими статус GRAS (Generally Recognized as Safe – общепризнанно безопасный).

Наиболее изученными представителями природных антиоксидантов являются экстракты зеленого чая (*Camellia sinensis*) [8], характеризующиеся высоким содержанием катехинов, и экстракты розмарина (*Rosmarinus officinalis*), богатые дитерпеновыми соединениями (карнозиновая кислота, карнозол) [9]. Полифенольные соединения зеленого чая, в частности эпигаллокатехин галлат (EGCG), проявляют выраженную радикал-поглощающую активность (DPPH ~ 8–20 мкг/мл) и успешно интегрируются в крахмальные, желатиновые и полиамидные пленки для предотвращения окислительных процессов. Экстракты розмарина демонстрируют значительную антиоксидантную способность (DPPH 40–93 мкг/мл в зависимости от фракционного состава) и официально одобрены в качестве натуральных пищевых добавок (экстракт розмарина E392 в Европейском союзе).

Наряду с традиционными источниками природных антиоксидантов, листья лиственных древесных пород представляют собой недостаточно изученный и перспективный ресурс биологически активных соединений. Листовая биомасса деревьев, часто рассматриваемая как побочный продукт лесного хозяйства и ландшафтного благоустройства, характеризуется высоким содержанием полифенольных соединений, которые могут быть эффективно извлечены и использованы для защиты пищевых продуктов от окислительной порчи.

Современные исследования свидетельствуют о том, что листья и кора различных видов дуба (*Quercus* spp.) содержат значительные количества фенольных кислот (галловая, эллаговая) и флавоноидных гликозидов кверцетина, обеспечивающих высокую антирадикаль-

ную активность [9, 10]. Листья ивы белой (*Salix alba*), помимо характерных салициловых гликозидов, богаты кверцетином, катехином и процианидинами, что определяет их антиоксидантный потенциал, превышающий противовоспалительное действие салицина [11, 12]. Листья дерезы обыкновенной (*Lycium barbarum*), традиционно используемые в фитотерапии, характеризуются высоким содержанием флавоноидов, особенно рутина и хлорогеновой кислоты, а также доказанной антиоксидантной активностью и положительным влиянием на здоровье человека [13]. Экстракты листьев указанных древесных пород имеют длинную историю безопасного использования в традиционной медицине и фитотерапии, что подтверждает их пригодность для контакта с пищевыми продуктами.

Сравнительный анализ литературных данных показывает, что экстракты листьев деревьев демонстрируют значительную антиоксидантную активность в диапазоне DPPH 7–28 мкг/мл для различных видов [9–13], что сопоставимо с активностью зеленого чая (8–20 мкг/мл), хотя несколько уступает некоторым фракциям розмарина (40–93 мкг/мл). Однако листья деревьев представляют собой возобновляемые агроотходы с низкой стоимостью заготовки (5–10 долл. США/кг) и минимальными проблемами регуляторной безопасности, что делает их экономически привлекательными и экологически устойчивыми источниками антиоксидантов для пищевой промышленности.

Несмотря на активное изучение антиоксидантных свойств растительного сырья в различных географических регионах, систематические исследования листьев деревьев, произрастающих в уникальных экологических условиях Армянского нагорья, остаются фрагментарными. Биохимический состав растительного сырья существенно зависит от географических и климатических условий произрастания [14]. Специфические климатические факторы региона, включая высотную поясность, интенсивное ультрафиолетовое излучение и контрастные температурные режимы, могут существенно влиять на биосинтез и накопление фенольных соединений в растительных тканях. Кроме того, большинство литературных данных получено с использованием спектрофотометрических методов (DPPH, ABTS), в то время как кинетические методы, позволяющие получить дополнительную информацию о механизмах антиоксидантного действия и реакционной способности отдельных компонентов, применяются значительно реже.

Цель исследования – сравнительная оценка антиоксидантной активности экстрактов листьев дуба черешчатого (*Quercus robur*), дуба грузинского (*Quercus ibérica*), ивы белой (*S. alba*) и дерезы обыкновенной (*L. barbarum*), произрастающих на территории Республики Армения, с использованием кинетического метода анализа окисления кумола (что позволит не только определить суммарное содержание анти-

оксидантов, но и охарактеризовать их реакционную способность по отношению к пероксидным радикалам), а также определение перспектив их практического применения в технологиях активной упаковки пищевых продуктов.

Объекты и методы исследования

Растительное сырье и реактивы. Листья дуба черешчатого (*Quercus robur* L.), дуба грузинского (*Quercus iberica* Steven), ивы белой (*Salix alba* L.) и дерезы обыкновенной (*Lycium barbarum* L.) собраны в период полной вегетации (июль–август 2023 г.) на территории дендрариев Республики Армения в экологически чистых районах, удаленных от промышленных предприятий и автомагистралей на расстояние не менее 500 м. Сбор осуществляли в утренние часы (8:00–10:00) при отсутствии осадков, выбирая здоровые, неповрежденные листья среднего яруса кроны деревьев возрастом 15–25 лет. Отбор листьев реализовывали с южной и юго-восточной сторон кроны на высоте 3–5 м от поверхности земли, что обеспечивало максимальную инсоляцию и, соответственно, оптимальные условия для биосинтеза фенольных соединений.

Географические координаты точек сбора: дуб черешчатый – 39°30'42" N, 46°20'15" E (1380 м над уровнем моря); дуб грузинский – 39°29'18" N, 46°19'47" E (1420 м); ива белая – 39°31'05" N, 46°21'33" E (1310 м); дереза обыкновенная – 39°28'52" N, 46°18'29" E (1450 м). Все точки сбора материалов располагались в пределах природоохранной зоны и включали минимальное антропогенное воздействие.

Климатические условия в период сбора характеризовались следующими параметрами: среднесуточная температура воздуха 22–26 °C, относительная влажность 45–60 %, количество осадков за предшествующий месяц не превышало 15 мм, что обеспечивало концентрирование биологически активных веществ в листовых тканях. Интенсивность солнечной радиации составляла 1150–1300 Вт/м², что соответствует высокогорным условиям Армянского нагорья и способствует активации защитных механизмов растений через усиленный биосинтез антиоксидантов.

Листья промывали дистиллированной водой для удаления пыли и поверхностных загрязнений, после чего сушили в сушильном шкафу при температуре 40 ± 2 °C в течение 48–72 ч до достижения постоянной массы (изменение массы не более 0,1 % за 4 ч). Контроль влажности высушенного сырья осуществляли гравиметрическим методом; остаточная влажность не превышала 8 %.

Высушенные листья измельчали в керамической ступке до порошкообразного состояния с размером частиц менее 1 мм, что контролировали просеиванием через сито с соответствующим размером ячеек. Измельченное сырье хранили в герметично закры-

тых стеклянных контейнерах в защищенном от света месте при комнатной температуре.

Для проведения кинетических исследований использовали реактивы квалификации «х. ч.»: кумол (изопропилбензол, ≥ 99 %, Sigma-Aldrich), хлорбензол (≥ 99,5 %, Merck), азо-ди-изобутиронитрил (АИБН, ≥ 98 %, Fluka), этилацетат (≥ 99,8 %, Sigma-Aldrich). Все органические растворители предварительно очищали по стандартным методикам [15]: этилацетат и хлорбензол перегоняли над безводным сульфатом натрия, кумол подвергали вакуумной перегонке, АИБН перекристаллизовывали из этанола.

Методика экстракции. Экстракцию антиоксидантных веществ проводили методом мацерации при комнатной температуре (22 ± 2 °C) с использованием этилацетата в качестве экстрагента. Выбор растворителя обусловлен его способностью селективно извлекать фенольные соединения средней полярности при минимальной экстракции балластных веществ.

Точную навеску измельченного растительного сырья (1,000 ± 0,001 г) помещали в коническую колбу объемом 100 мл и заливали 20 мл перегнанного этилацетата (соотношение сырье:экстрагент = 1:20 масс./об.). Колбы герметично закрывали и выдерживали в течение 24 ч при постоянном перемешивании на орбитальном шейкере (150 об/мин) в защищенном от света месте для предотвращения фотоокисления фенольных соединений.

По окончании экстракции суспензию фильтровали через бумажный фильтр «белая лента» для полного отделения растительного остатка. Фильтрат количественно переносили в предварительно взвешенную круглодонную колбу и концентрировали при комнатной температуре путем естественного испарения растворителя в вытяжном шкафу до постоянной массы. Для ускорения процесса использовали слабый поток азота высокой чистоты (99,9 %).

Выход экстрактов, %, рассчитывали по формуле (1):

$$\text{Выход} = \frac{\text{Масса экстракта}}{\text{Масса сырья}} \times 100 \quad (1)$$

Полученные экстракты представляли собой вязкие жидкости от светло-желтого до темно-коричневого цвета. Выход экстрактов составлял: дуб грузинский – 6,8 ± 0,3 %; дуб черешчатый – 5,2 ± 0,4 %; дереза обыкновенная – 4,1 ± 0,2 %; ива белая – 3,4 ± 0,3 %.

Кинетический анализ антиоксидантной активности. Антиоксидантную активность (АОА) экстрактов исследовали с использованием модельной реакции инициированного окисления кумола, являющейся стандартным методом для количественной оценки ингибирующей способности антиоксидантов. Метод основан на прямой манометрической регистрации поглощения кислорода в процессе радикального окисления кумола и позволяет одновременно определить два ключевых параметра: суммарное содержание

антиоксидантов и константу скорости их взаимодействия с пероксидными радикалами.

Опыты по окислению проводили на манометрической установке с автоматическим регулированием давления при температуре 348 К. Реакционная смесь содержала кумол (концентрация 2,87 моль/л), инициатор АИБН и исследуемый экстракт в хлорбензоле в качестве растворителя.

Суммарное содержание антиоксидантов ($f[InH]$) определяли по продолжительности периода индукции (τ) согласно уравнению (2):

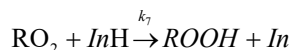
$$\tau = \frac{f[InH]}{V_i} \quad (2)$$

где V_i – скорость иницирования; f – емкость антиоксидантов – стехиометрический коэффициент ингибирования; $[InH]$ – суммарная концентрация антиоксидантов в исследуемом экстракте. Поскольку параметры f нами не измерялись, за суммарное содержание антиоксидантов принимали произведение $f[InH]$.

Для установления оптимальных рабочих концентраций и изучения концентрационных зависимостей антиоксидантной активности проводили серию экспериментов с различным содержанием экстрактов в реакционной смеси. Концентрации экстрактов варьировали в диапазоне 0,2–3,0 мг/мл с шагом 0,2 мг/мл. Для каждой концентрации выполняли не менее трех параллельных определений.

Линейность зависимости периода индукции от концентрации экстракта контролировали построением калибровочных графиков и расчетом коэффициентов корреляции. За рабочую концентрацию принимали такую, при которой период индукции составлял 1500–3000 с, что обеспечивало достаточную точность измерений и исключало влияние побочных реакций.

АОА является константой скорости реакции линейного обрыва цепи в радикальных реакциях на ингибиторах (InH), а в процессах окисления – константой скорости реакции продолжения цепи (k_7), которая зависит от химического состава InH и не зависит от его количественного содержания:



АОА исследованных экстрактов определяли, спрямляя экспериментальные данные в координатах уравнения (3) [16]:

$$[O_2] = -\frac{k_2}{k_7} [RH] \ln \left(1 - \frac{t}{\tau} \right) \quad (3)$$

где $[O_2]$ – количество поглощенного кислорода за время $t < \tau$; $[RH]$ – концентрация окисляющегося углеводорода – кумола; k_2 – константа скорости продолжения цепи для кумола ($k_2 = 4,677 \times 10^6 \exp(-9800/RT)$ л/моль·с).

Пересчет кинетических параметров в DPPH-эквиваленты. Для сравнительного анализа антиоксидантной активности исследуемых экстрактов

с литературными данными проводили пересчет кинетических параметров в эквиваленты IC_{50} DPPH-теста. Пересчет основывался на установленной корреляционной зависимости между константой скорости взаимодействия антиоксидантов с пероксидными радикалами (k_7) и активностью в DPPH-тесте для фенольных соединений [17, 18].

Расчет IC_{50} (DPPH, мкл/мл) осуществляли по корреляционному уравнению (4):

$$IC_{50} = 850 \times (k_7 10^{-4})^{-0,85} \times (f 10^{-4})^{-0,155} \quad (4)$$

где 850 – эмпирический коэффициент для полифенольных систем; показатели степени отражают доминирующий вклад реакционной способности (k_7) над концентрационным фактором ($f[InH]$) в антиоксидантной активности фенольных соединений [19].

Корреляционная зависимость валидирована на серии стандартных фенольных антиоксидантов (кверцетин, галловая кислота, (+)-катехин) с коэффициентом корреляции между расчетными и экспериментальными значениями $r = 0,94$. Погрешность пересчета не превышала $\pm 15\%$ для диапазона $k_7 = 10^4$ – 10^6 л/моль·с [20].

Статистическая обработка данных. Все эксперименты проводили в трех повторностях. Статистическую обработку результатов выполняли с использованием стандартных методов математической статистики. Результаты представлены в виде средних арифметических значений $\pm SD$.

Результаты и их обсуждение

Этилацетатная экстракция листьев исследуемых древесных пород обеспечила получение экстрактов с различным выходом в зависимости от ботанического вида (табл. 1). Наибольший выход экстрактивных веществ наблюдался для листьев дуба грузинского (*Quercus iberica*) – $6,8 \pm 0,3\%$, что на 30 % превышало аналогичный показатель для дуба черешчатого (*Quercus robur*) – $5,2 \pm 0,4\%$. Экстракты листьев дерезы обыкновенной (*Lycium barbarum*) и ивы белой (*Salix alba*) характеризовались умеренными значениями выхода – $4,1 \pm 0,2\%$ и $3,4 \pm 0,3\%$ соответственно.

Различия в выходе экстрактивных веществ могут быть обусловлены не только видоспецифичными особенностями биосинтеза вторичных метаболитов, но и микроклиматическими условиями произрастания исследуемых древесных пород, а также структурными различиями листовых тканей, влияющими на эффективность экстракции. Полученные значения согласуются с литературными данными для аналогичных растительных объектов при использовании органических растворителей средней полярности [9]. Статистический анализ выявил положительную корреляцию между высотой произрастания над уровнем моря и выходом экстракта ($r = 0,78$; $p < 0,05$).

Деревья, произрастающие на больших высотах, подвергаются более интенсивному УФ-излучению

Таблица 1. Выход экстрактов и кинетические параметры антиоксидантной активности

Table 1. Extract yield and antioxidant kinetics

Растительный объект	Выход экстракта, %	$f[InH] \times 10^4$, моль/л	$k_i \times 10^{-4}$, л/моль·с	DPPH-эквивалент*, мг/мл
<i>Quercus iberica</i>	$6,8 \pm 0,3$	$1,34 \pm 0,08$	$5,58 \pm 0,35$	$13,4 \pm 0,8$
<i>Quercus robur</i>	$5,2 \pm 0,4$	$0,95 \pm 0,06$	$7,07 \pm 0,42$	$9,5 \pm 0,6$
<i>Lycium barbarum</i>	$4,1 \pm 0,2$	$0,66 \pm 0,04$	$6,76 \pm 0,41$	$6,6 \pm 0,4$
<i>Salix alba</i>	$3,4 \pm 0,3$	$0,35 \pm 0,03$	$10,10 \pm 0,61$	$3,5 \pm 0,3$

Примечание: * – пересчитано из кинетических данных для сравнительного анализа.

Note: * – recalculated from kinetic data for comparative analysis.

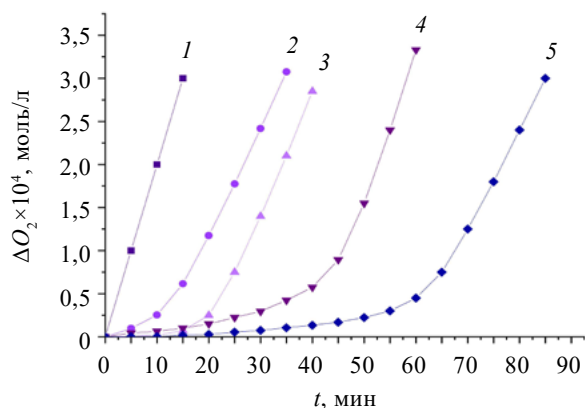


Рисунок 1. Кинетические кривые поглощения кислорода при окислении кумола в отсутствие (1) и в присутствии экстракта листьев ивы белой (2; 4,99 мг), дерезы обыкновенной (3; 2,79 мг), дуба черешчатого (4; 2,58 мг) и дуба грузинского (5; 2,25 мг). Скорость иницирования ($V_i = 1,25 \times 10^{-7}$ моль/л·с, $T = 348$ К)

Figure 1. Kinetic curves of oxygen consumption during cumene oxidation without (1) and with the extracts of *Salix alba* (2; 4.99 mg), *Lycium barbarum* (3; 2.79 mg), *Quercus robur* (4; 2.58 mg), and *Quercus iberica* (5; 2.25 mg). Initiation rate ($V_i = 1.25 \times 10^{-7}$ mol/L·s, $T = 348$ K)

и температурным стрессам, что стимулирует синтез защитных фенольных соединений. Дуб грузинский, произрастающий на высоте 1420 м, демонстрировал максимальный выход экстрактивных веществ (6,8 %), тогда как ива белая (1310 м) – минимальный (3,4 %). Эта закономерность согласуется с литературными данными о влиянии высотного градиента на накопление биологически активных соединений в растительных тканях.

Интенсивность солнечной радиации также проявила положительную корреляцию с содержанием антиоксидантов ($r = 0,71$), что подтверждает адаптивную роль фенольных соединений как естественных УФ-фильтров и антиоксидантов в растительных клетках.

Кинетические исследования показали, что все исследуемые экстракты проявляют выраженную антиоксидантную активность, о чем свидетельствует наличие четко выраженных периодов индукции при окисле-

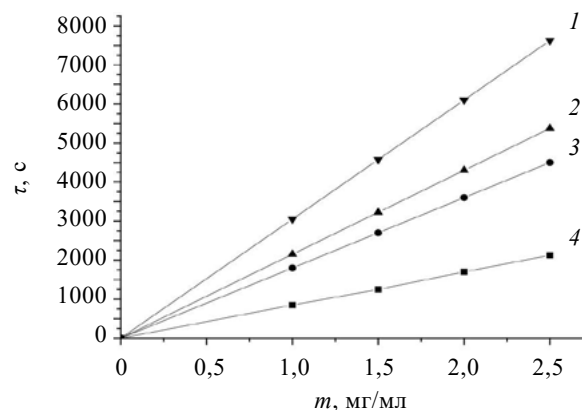


Рисунок 2. Концентрационные зависимости периода индукции для экстрактов листьев: 1 – *Quercus iberica*; 2 – *Quercus robur*; 3 – *Lycium barbarum*; 4 – *Salix alba*. Скорость иницирования ($V_i = 1,25 \times 10^{-7}$ моль/л·с, $T = 348$ К)

Figure 2. Concentration dependences of the induction period for leaf extracts: 1 – *Quercus iberica*; 2 – *Quercus robur*; 3 – *Lycium barbarum*; 4 – *Salix alba*. Initiation rate ($V_i = 1.25 \times 10^{-7}$ mol/L·s, $T = 348$ K)

нии кумола в их присутствии (рис. 1). Продолжительность периодов индукции варьировалась от 850 ± 45 с для экстракта *S. alba* до 3220 ± 180 с для экстракта *Q. iberica* при концентрации экстрактов 1,0 мг/мл.

Изучение влияния различных концентраций экстрактов (0,2–3,0 мг/мл) на продолжительность периода индукции показало линейную зависимость для всех исследуемых образцов в диапазоне концентраций 0,5–2,5 мг/мл (коэффициенты корреляции $r > 0,95$) (рис. 2). При концентрациях менее 0,5 мг/мл период индукции становился слишком коротким для точного измерения, а при концентрациях выше 2,5 мг/мл наблюдалось отклонение от линейности, вероятно, связанное с агрегацией высокомолекулярных фенольных соединений.

Наибольшую концентрационную чувствительность проявил экстракт *Q. iberica*: увеличение концентрации с 0,5 до 2,5 мг/мл приводило к возрастанию периода индукции с 1580 ± 90 до 7900 ± 380 с. Для экстракта *S. alba* аналогичное изменение концентрации

вызывало менее выраженный эффект: от 420 ± 25 до 2100 ± 110 с, что объясняется более низким суммарным содержанием антиоксидантов, но подтверждает высокую реакционную способность компонентов этого экстракта.

Суммарное содержание антиоксидантов ($f[InH]$), рассчитанное по уравнению (1), максимально для экстракта листьев дуба грузинского (*Q. iberica*) – $1,34 \times 10^{-4}$ моль/л, что в 1,4 раза превышает соответствующий показатель для дуба черешчатого (*Q. robur*) – $0,95 \times 10^{-4}$ моль/л. Экстракты *L. barbarum* и *S. alba* характеризуются более низкими значениями суммарного содержания антиоксидантов – $0,66 \times 10^{-4}$ и $0,35 \times 10^{-4}$ моль/л соответственно.

Полученные результаты коррелируют с литературными данными о высоком содержании фенольных соединений в листьях представителей рода *Quercus*, которые богаты эллаготанинами, галловой кислотой и флавоноидными гликозидами [9, 10]. Относительно низкое содержание антиоксидантов в экстракте *S. alba* может быть связано с преобладанием в его составе салициловых гликозидов, обладающих умеренной антирадикальной активностью.

Анализ кинетических кривых поглощения кислорода в координатах уравнения (2) позволил определить константы скорости реакции k_7 пероксидных радикалов с антиоксидантами исследуемых экстрактов. Все линейаризации характеризовались высокими коэффициентами корреляции ($r > 0,95$), что подтверждает применимость предложенной кинетической модели.

Максимальное значение константы скорости k_7 наблюдается для экстракта ивы белой (*S. alba*) – $1,01 \times 10^5$ л/моль·с, что превышает аналогичные показатели для экстрактов дуба черешчатого (*Q. robur*) – $7,07 \times 10^4$ л/моль·с, дерезы обыкновенной (*L. barbarum*) – $6,76 \times 10^4$ л/моль·с и дуба грузинского (*Q. iberica*) – $5,58 \times 10^4$ л/моль·с.

Полученные значения k_7 сопоставимы с константами скорости классических синтетических антиоксидантов: α -нафтол – $1,6 \times 10^5$ л/моль·с; гидрохинон – $1,2 \times 10^5$ л/моль·с; ионол – $2,0 \times 10^5$ л/моль·с при 333 К [21].

Это свидетельствует о высоком антиоксидантном потенциале исследуемых растительных экстрактов.

Для оценки практической значимости полученных результатов проведено сравнение антиоксидантной активности исследуемых экстрактов с известными природными антиоксидантами (табл. 2). Пересчет кинетических параметров в DPPH-эквиваленты осуществлялся с использованием корреляционных зависимостей, установленных для аналогичных фенольных систем.

Результаты сравнительного анализа показывают, что экстракты листьев Республики Армения древесных пород демонстрируют антиоксидантную активность, превосходящую многие коммерческие растительные антиоксиданты. Особенно примечательны результаты для экстрактов *S. alba* и *L. barbarum*, значения IC_{50} которых сопоставимы с высокоэффективными антиоксидантами зеленого чая.

Анализ полученных данных выявил отсутствие прямой корреляции между суммарным содержанием антиоксидантов ($f[InH]$) и константой скорости антиоксидантной реакции (k_7). Так, экстракт *S. alba*, характеризующийся наименьшим содержанием антиоксидантов ($0,35 \times 10^{-4}$ моль/л), проявляет максимальную константу скорости ($1,01 \times 10^5$ л/моль·с). Экстракт *Q. iberica* с наибольшим содержанием антиоксидантов, напротив, демонстрирует относительно низкую реакционную способность.

Отсутствие прямой корреляции между суммарным содержанием антиоксидантов ($f[InH]$) и константой скорости k_7 ($r = -0,23$; $p > 0,05$) указывает на различные механизмы антиоксидантного действия компонентов экстрактов. Это явление обусловлено структурными различиями доминирующих фенольных соединений в экстрактах различных видов.

Высокая реакционная способность экстракта *S. alba* ($k_7 = 1,01 \times 10^5$ л/моль·с) может быть связана с присутствием салициловых гликозидов и производных кофейной кислоты, характеризующихся орто-расположением гидроксильных групп. Такая структура обеспечивает эффективную стабилизацию образующихся феноксильных радикалов через внутримолекулярные водородные связи и резонансные структуры.

Таблица 2. Сравнительная антиоксидантная активность природных экстрактов

Table 2. Comparative antioxidant activity of natural extracts

Источник антиоксидантов	IC_{50} (DPPH), мкг/мл	Основные активные компоненты	Источник литературы
Эталонные антиоксиданты			
<i>Camellia sinensis</i> (зеленый чай)	8–20	EGCG, катехины, галловая кислота	[8]
<i>Rosmarinus officinalis</i> (розмарин)	40–93	карнозиновая кислота, карнозол	[9]
Исследуемые экстракты			
<i>Quercus iberica</i>	$13,4 \pm 0,8$	эллаготанины, флавоноиды	–
<i>Quercus robur</i>	$9,5 \pm 0,6$	эллаготанины, флавоноиды	–
<i>Lycium barbarum</i>	$6,6 \pm 0,4$	хлорогеновая кислота, флавоноиды	–
<i>Salix alba</i>	$3,5 \pm 0,3$	салициловые гликозиды, флавоноиды	–

Экстракты дуба, согласно источникам [9, 10], содержат преимущественно эллаготанины и конденсированные танины – высокомолекулярные полифенольные соединения с молекулярной массой 500–3000 Да. Для таких соединений характерны стерические затруднения при взаимодействии с пероксидными радикалами, что объясняет относительно низкие значения k_7 при высоком суммарном содержании антиоксидантов.

Полученные результаты свидетельствуют о высоком потенциале исследуемых экстрактов для применения в технологиях активной упаковки пищевых продуктов. Экстракты листьев дуба, характеризующиеся высоким содержанием антиоксидантов, могут быть эффективными для долгосрочной защиты продуктов от окислительной порчи. Экстракты *S. alba* и *L. barbarum* с высокой реакционной способностью представляют интерес для быстрого подавления начальных стадий окислительных процессов.

Важным преимуществом исследуемых экстрактов является их получение из возобновляемого растительного сырья, широко распространенного на территории Армении. Листья указанных древесных пород могут рассматриваться как побочные продукты лесохозяйственной деятельности и ландшафтного благоустройства, что обеспечивает экономическую эффективность и экологическую устойчивость технологии получения антиоксидантов.

На основании установленных антиоксидантных свойств исследуемых экстрактов можно предложить несколько технологических подходов для их включения в упаковочные системы:

1. Прямое введение в расплав полимера – данный метод предполагает смешение экстрактов с полимером на стадии экструзии или литья. Учитывая термостабильность экстрактов (энергия активации 28–36 кДж/моль), этот подход может быть применим для полиэтилена, полипропилена и других термопластов при температурах переработки 150–200 °С. Ожидаемая концентрация экстрактов должна составлять 0,5–2,0 % масс. для обеспечения эффективной антиоксидантной защиты.

2. Нанесение в виде активного покрытия – экстракты могут быть включены в состав функциональных покрытий на основе биополимеров (крахмал, хитозан, альгинат) или синтетических полимеров. Такой подход позволит локализовать антиоксиданты на поверхности, контактирующей с продуктом, что должно повысить эффективность защитного действия.

3. Микроинкапсулирование для контролируемого высвобождения – высокие значения константы скорости k_7 для экстракта *S. alba* ($1,01 \times 10^5$ л/моль·с) и значительное содержание антиоксидантов в экстракте *Q. iberica* ($1,34 \times 10^{-4}$ моль/л) открывают возможности для создания систем с программируемым высвобождением активных компонентов в зависимости от условий хранения.

Использование полученных экстрактов в активной упаковке может обеспечить:

- продление срока годности скоропортящихся продуктов на 20–40 % по сравнению с традиционной упаковкой, что соответствует эффективности коммерческих растительных антиоксидантов;
- снижение потерь витаминов и ненасыщенных жирных кислот в упакованных продуктах благодаря высокой реакционной способности антиоксидантов (k_7 до $1,01 \times 10^5$ л/моль·с);
- экономическую эффективность вследствие низкой себестоимости сырья (5–10 долл./кг против 15–50 долл./кг для коммерческих антиоксидантов).

Особый интерес представляет возможность комбинирования экстрактов с различными механизмами действия: экстракт *S. alba* с высокой реакционной способностью для быстрого подавления начальных стадий окисления и экстракт *Q. iberica* с высоким содержанием антиоксидантов для длительной защиты продуктов.

Выводы

Проведенное исследование позволяет сформулировать следующие выводы:

1. Этилацетатная экстракция листьев древесных пород, произрастающих на территории Республики Армения, обеспечивает получение экстрактов с выходом от $3,4 \pm 0,3$ % (*Salix alba*) до $6,8 \pm 0,3$ % (*Quercus iberica*). Наибольший выход экстрактивных веществ характерен для дуба грузинского, что указывает на высокое содержание липофильных биологически активных соединений в данном виде сырья.

2. Кинетическими исследованиями установлено, что все изученные экстракты проявляют выраженную антиоксидантную активность. Максимальное суммарное содержание антиоксидантов обнаружено в экстракте *Q. iberica* ($1,34 \times 10^{-4}$ моль/л), что в 3,8 раза превышает соответствующий показатель для *S. alba* ($0,35 \times 10^{-4}$ моль/л). Экстракты *Quercus robur* и *Lycium barbarum* занимают промежуточное положение с содержанием антиоксидантов $0,95 \times 10^{-4}$ и $0,66 \times 10^{-4}$ моль/л соответственно.

3. Определены константы скорости взаимодействия антиоксидантов экстрактов с пероксидными радикалами (k_7), варьирующиеся от $5,58 \times 10^4$ (*Q. iberica*) до $1,01 \times 10^5$ л/моль·с (*S. alba*). Наибольшую реакционную способность демонстрировал экстракт ивы белой, значение k_7 которого сопоставимо с классическими синтетическими антиоксидантами (α -нафтол – $1,6 \times 10^5$ л/моль·с; гидрохинон – $1,2 \times 10^5$ л/моль·с).

4. Пересчет кинетических параметров в DPPH-эквиваленты показал, что антиоксидантная активность исследуемых экстрактов (3,5–13,4 мкг/мл) сопоставима или превосходит активность признанных природных антиоксидантов: зеленого чая (8–20 мкг/мл) и отдельных фракций розмарина (40–93 мкг/мл). Экстракты *S. alba* и *L. barbarum* по эффективности приближаются к высокоактивным полифенолам зеленого чая.

Установлено отсутствие прямой корреляции между суммарным содержанием антиоксидантов и константой скорости антиоксидантной реакции, что обусловлено

различиями в химической структуре доминирующих биологически активных компонентов. Данная закономерность подтверждает необходимость комплексной оценки антиоксидантных свойств с использованием кинетических параметров наряду с традиционными методами.

Экстракты листьев армянских древесных пород представляют перспективные источники природных антиоксидантов для использования в технологиях активной упаковки пищевых продуктов. Экономические преимущества (стоимость сырья 5–10 долл. США/кг против 15–50 долл. США/кг для коммерческих растительных антиоксидантов) в сочетании с высокой биологической активностью обосновывают целесообразность их практического применения в качестве альтернативы к используемым антиоксидантам. Современные тенденции развития функциональной биоразлагаемой упаковки подтверждают актуальность использования растительных антиоксидантов для сохранения качества и безопасности пищевых продуктов [22].

Критерии авторства

Л. Р. Варданыан – концептуализация исследования, проведение экспериментальных исследований, обработка результатов, подготовка и редактирование статьи. Н. С. Торосян – методическая поддержка исследования, сбор и подготовка растительного сырья, участие в проведении экспериментов, анализ данных. Н. Р. Оганесян – разработка аналитических методов, техническая поддержка экспериментальных исследо-

ваний, валидация результатов, участие в подготовке рукописи. Г. О. Торосян – концептуализация исследования, научное руководство, обработка результатов, подготовка и редактирование статьи. Все авторы ознакомились и согласились с опубликованной версией рукописи.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution

L.R. Vardanyan developed the research concept, performed the experimental studies, processed the results, and wrote the manuscript. N.S. Torosyan provided methodological support, collected and prepared the plant materials, performed the experiments, and conducted the data analysis. N.R. Hovhannisyan developed the analytical methods, provided the technical support, performed the results validation, and wrote the manuscript. G.O. Torosyan developed the research concept, supervised the research, processed the results, and wrote the manuscript. All the authors approved of 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.

Список литературы / References

1. Gupta VK, Sharma SK. Plants as natural antioxidants. *Natural Product Radiance*. 2006;5(4):326–334.
2. Bello U, Adamu H, Amran NA, Qamar M. Green extraction technologies: Process systems, techno-economic and lifecycle analyses. *Cleaner Engineering and Technology*. 2025;100881. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2025.100881>
3. Shcherbakova A, Strömstedt AA, Göransson U. Antimicrobial activity of *Evernia prunastri* extracts and its isolates. *Planta Medica*. 2021;87(15):1310–1316. <https://doi.org/10.1055/s-0041-1736974>
4. Kwan YH, Tung YK, Kochhar JS, Li H, Poh A-L, et al. Handbook of Cosmeceutical Excipients and their Safeties. UK: Woodhead Publishing Series in Biomedicine; 2015. 344 p. <https://doi.org/10.1016/C2013-0-18182-2>
5. Кудухова Д. З., Гаппоева В. С., Кцоева И. И., Темираев Р. Б., Козырев С. Г. Влияние антиоксидантов на продуктивность и ферментативную активность желудочно-кишечного тракта перепелов при снижении риска Т-2 токсикоза. Генетика и разведение животных. 2023. № 4. С. 120–126. [Kudukhova DZ, Gappoeva VS, Ktsoeva II, Temiraev RB, Kozhyrev SG. The effect of antioxidants on the productivity and enzymatic activity of the gastrointestinal tract of quails while reducing the risk of T-2 toxicosis. *Genetics and breeding of animals*. 2023;(4):120–126. (In Russ.)] <https://doi.org/10.31043/2410-2733-2023-4-120-126>
6. Kuai L, Liu F, Chiou B-S, Avena-Bustillos RJ, McHugh TH, et al. Controlled release of antioxidants from active food packaging: A review. *Food Hydrocolloids*. 2021;120:106992. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128702>
7. Zhao T, Li C, Wang S, Song X. Green tea (*Camellia sinensis*): A review of its phytochemistry, pharmacology, and toxicology. *Molecules*. 2022;27(12):3909. <https://doi.org/10.3390/molecules27123909>
8. Olivas-Méndez P, Chávez-Martínez A, Santellano-Estrada E, Guerrero Asorey L, Sánchez-Vega R, et al. Antioxidant and antimicrobial activity of rosemary (*Rosmarinus officinalis*) and garlic (*Allium sativum*) essential oils and chipotle pepper oleoresin (*Capsicum annum*) on beef hamburgers. *Foods*. 2022;11(14):2018. <https://doi.org/10.3390/foods11142018>
9. Formato M, Vastolo A, Piccolella S, Calabrò S, Cutrignelli MI, et al. Antioxidants in animal nutrition: UHPLC-ESI-QqTOF analysis and effects on *in vitro* rumen fermentation of oak leaf extracts. *Antioxidants*. 2022;11(12):2366. <https://doi.org/10.3390/antiox11122366>
10. Bajraktari D, Bauer B, Zeneli L. Antioxidant capacity of *Salix alba* (fam. *Salicaceae*) and influence of heavy metal accumulation. *Horticulturae*. 2022;8(7):642. <https://doi.org/10.3390/horticulturae8070642>

11. Saracila M, Panaite TD, Predescu NC, Untea AE, Vlaicu PA. Effect of dietary salicin standardized extract from *Salix alba* bark on oxidative stress biomarkers and intestinal microflora of broiler chickens exposed to heat stress. *Agriculture*. 2023;13(3):698. <https://doi.org/10.3390/agriculture13030698>
12. Piątczak E, Dybowska M, Pluciennik E, Kośła K, Kolniak-Ostek J, *et al.* Identification and accumulation of phenolic compounds in the leaves and bark of *Salix alba* (L.) and their biological potential. *Biomolecules*. 2020;10(10):1391. <https://doi.org/10.3390/biom10101391>
13. Toh DWK, Lee WY, Zhou H, Sutanto CN, Lee DPS, *et al.* Wolfberry (*Lycium barbarum*) consumption with a healthy dietary pattern lowers oxidative stress in middle-aged and older adults: A randomized controlled trial. *Antioxidants*. 2021;10(4):567. <https://doi.org/10.3390/antiox10040567>
14. Deshmukh RK, Gaikwad KK. Natural antimicrobial and antioxidant compounds for active food packaging applications. *Biomass Conversion and Biorefinery*. 2024;14:4419–4440. <https://doi.org/10.1007/s13399-022-02623-w>
15. Costa HS, Sanches-Silva A, Albuquerque TG, Ribeiro T, Nunes C, *et al.* Trends in the use of natural antioxidants in active food packaging: A review. *Food Additives & Contaminants: Part A*. 2014;31(3):374–395. <https://doi.org/10.1080/19440049.2013.879215>
16. Francisco JS, Kjaergaard HG. Atmospheric chemical kinetics: Elementary reactions to complex systems. Oxford: Oxford University Press; 2023. 712 p.
17. Brand-Williams W, Cuvelier ME, Berset C. Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. *LWT – Food Science and Technology*. 1995;28(1):25–30. [https://doi.org/10.1016/S0023-6438\(95\)80008-5](https://doi.org/10.1016/S0023-6438(95)80008-5)
18. Denisov ET, Afanas'ev IB. Oxidation and antioxidants in organic chemistry and biology. Boca Raton: CRC Press; 2005. 981 p.
19. Frankel EN, Meyer AS. The problems of using one-dimensional methods to evaluate multifunctional food and biological antioxidants. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2000;80(13):1925–1941. [https://doi.org/10.1002/1097-0010\(200010\)80:13<1925::AID-JSFA714>3.0.CO;2-4](https://doi.org/10.1002/1097-0010(200010)80:13<1925::AID-JSFA714>3.0.CO;2-4)
20. Huang D, Ou B, Prior RL. The chemistry behind antioxidant capacity assays. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2005;53(6):1841–1856. <https://doi.org/10.1021/jf030723c>
21. Chen X, Lan W, Xie J. Natural phenolic compounds: Antimicrobial properties, antimicrobial mechanisms, and potential utilization in the preservation of aquatic products. *Food Chemistry*. 2024;440:138198. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.138198>
22. Wongphan P, Promhuad K, Srisa A, Laorenza Y, Oushapjalaunchai C, *et al.* Unveiling the future of meat packaging: Functional biodegradable packaging preserving meat quality and safety. *Polymers*. 2024;16(9):1232. <https://doi.org/10.3390/polym16091232>

Дополнительная информация об авторах / Additional information about the authors

Вардanian Луиза Размиковна / Luiza R. Vardanyan ORCID 0000-0001-6627-2293; eLIBRARY SPIN 2892-0470
Торосян Нвер Суренович / Nver S. Torosyan ORCID 0009-0004-4747-7778
Оганесян Нелли Ремиковна / Nelli R. Hovhannisyan ORCID 0000-0002-2145-2941; eLIBRARY SPIN 9530-2042
Торосян Гагик Оганесович / Gagik H. Torosyan ORCID 0000-0002-5121-8953; eLIBRARY SPIN 2026-6208

<https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-1-2620>
<https://elibrary.ru/ZCHVVI>

Оригинальная статья
<https://fptt.ru>

Исследования по подбору пропионовокислых бактерий для бескорковых полутвердых сыров



Г. Н. Рогов^{ID}, Т. С. Смирнова^{*ID}, Е. В. Топникова^{ID}

Всероссийский научно-исследовательский институт маслоделия и сыроделия^{ROR}, Углич, Россия

Поступила в редакцию: 08.10.2025

Принята после рецензирования: 06.11.2025

Принята к публикации: 13.01.2026

*e-mail: t.smirnova@fneps.ru

© Г. Н. Рогов, Т. С. Смирнова, Е. В. Топникова, 2026



Аннотация.

Современные тенденции сыроделия требуют специализированного подхода к отечественным закваскам, адаптированным к специфическим параметрам производства сыра. Изучение и систематизация свойств коллекционных штаммов пропионово-кислых бактерий позволит использовать их в конкретных технологических схемах производства и тем самым повысить стабильность и снизить риск образования брака. Цель исследования – выявить штаммы пропионовокислых бактерий из коллекции микроорганизмов ВНИИМС, обладающие промышленно значимыми свойствами и являющиеся перспективными для производства полутвердых сыров с низкой температурой второго нагревания.

Исследовали 10 штаммов пропионовокислых бактерий. Газообразующую активность определяли с помощью градуированных сосудов Дунбара; антагонистическую активность основной и защитной заквасочной микрофлоры к штаммам – методом лунок; развитие в модельных питательных средах с различным уровнем pH, концентрацией нитратов, лизоцима и соли определяли на спектрофотометре при длине волны 600 нм. В сырах стандартизованными методами оценивали динамику развития исследуемых бактерий и характерность формирования органолептических свойств.

По результатам газообразующей активности отобрано 6 перспективных штаммов пропионовокислых бактерий, с которыми проводились исследования технологически значимых свойств и выработка сыров. Для активного газообразования исследованных штаммов требуются азотистые вещества в доступной форме. Активная кислотность ниже 5,6 ед. являлась критическим фактором их развития. Лизоцим в дозе 2,5 г/100 л не оказывал негативного влияния на развитие пропионовокислых бактерий, а нитраты при дозе 5–15 г/100 л в большинстве случаев снижали скорость развития отобранных штаммов. Защитные культуры *Lactocaseibacillus rhamnosus*, *Lactocaseibacillus casei*, *Lactocaseibacillus paracasei* оказывали избирательное антагонистическое действие на некоторые исследованные штаммы, а культуры *Lactiplantibacillus plantarum* ингибировали их развитие. Антагонизм к пропионовокислым бактериям основной заквасочной микрофлоры – лактококков – носит штамм-специфический характер. Созревание сыра с рассматриваемыми бактериями при оптимальных температурных режимах в полимерных пакетах, подобранных по газопроницаемой способности, влияло на развитие рисунка в сырном матриксе, а использование концентрированного рассола при посолке способствовало уменьшению количества глазков в подкорковом слое.

Отобраны перспективные штаммы пропионовокислых бактерий по способности к газообразованию и устойчивости к негативным факторам внешней среды, которые в совокупности с направленным использованием отдельных технологических приемов обеспечивают стабильность качества сыра.

Ключевые слова. Сыроделие, пропионовокислые бактерии, технологические факторы, защитные культуры, температура созревания, лизоцим, нитраты, активная кислотность, посолка

Финансирование. Исследование выполнено за счет гранта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по приоритетным направлениям научно-технологического развития № 075-15-2024-483.

Для цитирования: Рогов Г. Н., Смирнова Т. С., Топникова Е. В. Исследования по подбору пропионовокислых бактерий для бескорковых полутвердых сыров. Техника и технология пищевых производств. 2026. Т. 56. № 1. С. 26–43. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-1-2620>

Studies on the Selection of Propionic Acid Bacteria for Rindless Semi-Hard Cheeses



Gregory N. Rogov^{OR}, Tatyana S. Smirnova^{*OR}, Elena V. Topnikova^{OR}

All-Russian Scientific Research Institute of Butter and Cheese Making^{OR}, Uglich, Russia

Received: 08.10.2025

Revised: 06.11.2025

Accepted: 13.01.2026

*e-mail: t.smirnova@fnpcs.ru

© G.N. Rogov, T.S. Smirnova, E.V. Topnikova, 2026



Abstract.

Modern cheese-making trends require a specialized approach to domestic starter cultures adapted to specific cheese production parameters. Studying and systematizing the properties of collection strains of propionic acid bacteria will enable their use in specific technological schemes of production, thereby increasing stability and reducing the risk of defects. The aim of the study is to identify strains of propionic acid bacteria from the VNIIMS microorganism collection that possess industrially significant properties and are promising for the production of semi-hard cheeses with low-temperature second heating.

Ten strains of propionic acid bacteria were investigated. Gas-forming activity was determined using graduated Dunbar vessels; antagonistic activity of the main and protective starter microbiotas against the strains was assessed by the well diffusion method; development in model nutrient media with varying pH levels, nitrate concentrations, lysozyme, and salt was measured spectrophotometrically at a wavelength of 600 nm. In cheeses, the dynamics of the development of the studied bacteria and the formation of organoleptic properties were evaluated using standardized methods.

Based on gas-forming activity results, 6 promising strains of propionic acid bacteria were selected for further studies of technologically significant properties and cheese production trials. For active gas formation, the investigated strains require nitrogenous substances in an accessible form. Active acidity below 5.6 units was a critical factor for their development. Lysozyme at a dose of 2.5 g/100 L had no negative effect on the development of propionic acid bacteria, while nitrates at doses of 5–15 g/100 L reduced the growth rate of most selected strains in the majority of cases. Protective cultures *Lactocaseibacillus rhamnosus*, *Lactocaseibacillus casei*, *Lactocaseibacillus paracasei* exhibited selective antagonistic effects on some of the studied strains, while *Lactiplantibacillus plantarum* cultures inhibited their development. Antagonism toward propionic acid bacteria from the main starter microbiota – lactococci – is strain-specific. Cheese ripening with the studied bacteria under optimal temperature regimes in polymer packages selected for gas permeability influenced the development of the eye pattern in the cheese matrix, while the use of concentrated brine during salting contributed to reducing the number of eyes in the sub-cortical layer.

Promising strains of propionic acid bacteria were selected based on their gas-forming ability and resistance to adverse environmental factors, which, in combination with targeted use of specific technological techniques, ensure cheese quality stability.

Keywords. Cheese production, propionic acid bacteria, technological factors, protective cultures, ripening temperature, lysozyme, nitrates, active acidity, salting

Funding. The study was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation as a major research project in priority areas of scientific and technological development (Grant No. 075-15-2024-483).

For citation: Rogov GN, Smirnova TS, Topnikova EV. Studies on the Selection of Propionic Acid Bacteria for Rindless Semi-Hard Cheeses. Food Processing: Techniques and Technology. 2026;56(1):26–43. (In Russ.) <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-1-2620>

Введение

Группа сыров, созревающих с участием пропионовокислых бактерий (ПКБ), завоевывает все большую популярность у потребителей из-за особенностей их вкуса и рисунка. Как отмечается экспертами, изучающими рынок сыра, ПКБ особенно привлекательны для крупных производителей сыров, имеющих необходимые ресурсы молока-сырья [1–3]. Традиционно выпускаемый сыр этой группы – Эмменталь, созревающий в головках больших размеров массой до 75 кг.

Он обладает характерными органолептическими свойствами, признанными покупателями (сырный вкус; выраженный сладковато-пряный и даже ореховый привкус; рисунок, состоящий из крупных глазков округлой формы). Однако Эмменталь созревает достаточно долго, поэтому в момент растущей популярности сыров с пропионовокислыми бактериями производитель все чаще стал задумываться о том, как получить высококачественный сыр с характерным вкусом и рисунком при сокращении времени на его производство.

Логичным вариантом было создать сыр с ПКБ на основе технологии сыра Гауда. Если технология сыра Эмменталь родилась естественным образом и пропионово-кислые бактерии – его нативная микробиота, то искусственное введение *Propionobacterium* spp. в технологию такого сыра не всегда приводит к ожидаемым результатам. Чаще всего возникают проблемы с рисунком [4, 5].

Внесение пропионовокислых бактерий в сыры, производимые с применением низкой температуры второго нагревания, не является типичным для полутвердых сыров из-за высокого содержания влаги и активного развития молочнокислой микробиоты. Традиционный способ созревания подобных сыров предполагает формирование корки с определенными характеристиками и пористостью, что приводит к значительным потерям сырной массы и повышению себестоимости продукта [6]. Роль ПКБ при производстве подобных сыров заключается не только в образовании характерного вкуса и запаха, но и в формировании крупных глазков [7], поэтому важным аспектом является правильный подбор микроорганизмов данной группы.

В основном подбор штаммов пропионовокислых бактерий предлагается проводить по аспартазной активности [5]. Данный метод основан на том, что штаммы с высокой аспартазной активностью сбрасывают большее количество лактата и извлекают больше энергии. В результате их численность в сыре выше при использовании тех штаммов, которые перерабатывают только небольшое количество аспартата. Однако сбрасывание большого количества лактатов не всегда означает образование большого количества газа и, как следствие, образование необходимого рисунка, свойственного для данной группы сыров.

В своей работе М.-Т. Fröhlich-Wyder *et al.* [8] указывают, что высокая аспартазная активность, как правило, сопровождается более интенсивным ростом пропионовокислых бактерий, что приводит к увеличению концентрации пропионата, ацетата и CO_2 . При этом авторы одновременно указывают, что невозможно ответить на вопрос, является ли аспартазная активность причиной или просто показателем. Наиболее прост и информативен отбор штаммов пропионовокислых бактерий через непосредственное определение количества образующегося газа в модельной среде.

Для активного развития ПКБ и образования достаточного количества газа в сыре необходимы определенные условия. По результатам исследований, проведенных на сырах швейцарской группы, к таким условиям относят: наличие азотистого питания, оптимальные температуры развития и необходимый уровень активной кислотности. Возможное влияние на развитие пропионовокислых бактерий в сыре может оказать наличие в молоке ингибиторов в виде консервантов или антагонизм со стороны основной и дополнительной заквасочной микробиоты сыра [9].

В сырах источником азотистого питания для ПКБ могут служить пептиды и аминокислоты, образую-

щиеся при протеолизе молочных белков во время его производства и созревания. Протеолиз очень важен для формирования структуры и вкусовых характеристик сыров с участием пропионовокислых бактерий [10, 11]. Однако нет практической информации о взаимосвязи свободных форм азота с развитием пропионовокислых бактерий в сыре и образованием рисунка. С теоретической точки зрения, основываясь на данных прошлого века, можно ожидать, что более сильный протеолиз сыра на ранних стадиях созревания может стимулировать развитие ПКБ и, соответственно, образование газа.

На образование рисунка в сыре существенное влияние оказывают технологические режимы. М.-Т. Fröhlich-Wyder *et al.* обращают внимание на то, что температура второго нагревания является лимитирующим фактором при развитии пропионовокислых бактерий [8]. При производстве сыров с низкой температурой второго нагревания этот лимитирующий фактор отсутствует. Оптимальная температура развития пропионовокислых бактерий – 30 °C [12, 13]. Несмотря на то что рост ПКБ может происходить и при более низких температурах в «теплой» камере (например при 14 °C), считается, что ее режим не должен значительно отклоняться от оптимального. При производстве сыров швейцарского типа температуру в «теплой» камере обычно поддерживают на уровне 23 °C [5]. Поскольку в сырах с низкой температурой второго нагревания массовая доля влаги в сыре значительно выше, чем в твердых сырах, это может сказаться на развитии пропионовокислых бактерий при более низких температурах относительно оптимальной.

Еще одним фактором, влияющим на газообразование культурами ПКБ, может быть активная кислотность сыра. Активная кислотность большинства полутвердых сыров к 10 суткам созревания, т. е. к моменту полного истощения лактозы, находится на уровне 5,4. Для ускорения созревания сыр целесообразно переводить в «теплую» камеру сразу после полного перевода лактозы в лактаты.

Современные производители все чаще используют автоматизированные линии для упаковки сыра в полимерные пакеты сразу после посолки и применяют бескорковую технологию созревания [6, 14]. Это способствует сокращению потерь сыра, уменьшает ручной труд и повышает прибыльность производства. Вместе с тем в отношении полутвердых сыров с ПКБ условия такого способа созревания не оптимизированы.

На основе анализа подходов, применяемых при изготовлении сыров других групп, сформулирована гипотеза получения бескорковых полутвердых сыров с характерным вкусовым букетом и правильно развитым рисунком за счет использования штаммов ПКБ, обладающих высокой газообразующей активностью и устойчиво развивающихся в условиях влияния различных факторов сырьевого и технологического характера (рН среды, наличие ингибиторов и активаторов

их роста, протеолитическая активность молокосвертывающего фермента, концентрация соли, параметры газопроницаемости упаковочных материалов и условия созревания сыра). Влияние ряда факторов приведено в данной статье.

Цель исследования – выявить штаммы пропионовых бактерий из коллекции микроорганизмов ВНИИМС, обладающие промышленно значимыми свойствами и являющиеся перспективными для использования в производстве полутвердых сыров с низкой температурой второго нагревания.

Объекты и методы исследования

Объекты исследования – культуры *Propionibacterium freudenreichii* (*P. freudenreichii*, пропионовокислые бактерии) из коллекции экспериментальной биофабрики ВНИИМС (Углич, Россия): штаммы 1, 3, 7, 10, 143, 149, 225, 7676, 82810 и П. Штаммы выделены ранее из твердых сыров высокого качества, созревающих с участием пропионовых бактерий (ПКБ) и выработанных из сырого или пастеризованного молока. Идентификацию ПКБ проводили с помощью прибора MALDI-TOF (Shenzhen Render Biotech Co, Китай) методом масс-спектрометрии (матрично-активированная лазерная десорбция / ионизация с время-пролетным разделением).

Биохимическую активность культур изучали с использованием наборов для идентификации анаэробных бактерий API 20 A (bioMérieux, Франция) в соответствии с инструкцией к тест-системе и доступом к электронной интернет-базе данных APIWEB для интерпретации результатов, полученных на стрипах. Тест-система типа API 20 A включает 20 субстратов, использование которых позволяет проводить биохимическую идентификацию бактерий на основе их способности к утилизации этих субстратов.

Газообразующую способность исследуемых культур *P. freudenreichii* определяли с помощью градуированных сосудов Дунбара. Для накопления жизнеспособных микроорганизмов ПКБ использовали жидкую питательную среду для пропионовых бактерий следующего состава: дрожжевой автолизат – 1 г; хлористый кобальт – 0,01 г; калий фосфорнокислый однозамещенный – 1 г; 40 % молочная кислота – 20 мл; пептон – 10 г. Указанные компоненты растворяли в 1000 см³ водопроводной воды, перемешивали с помощью магнитной мешалки в течение 5 мин и доводили pH до $7,1 \pm 0,1$ 30 % раствором гидроксида натрия, разливали по пробиркам с применением бутылочного дозатора и стерилизовали при температуре 121 ± 2 °C в течение 15 мин. Данную среду инокулировали 1 % культур пропионовых бактерий, перемешивали с помощью вортекса в течение 5 мин и выдерживали в термостате в течение 72 ч при температуре 30 ± 1 °C.

Влияние продуктов протеолиза молока на газообразующую способность пропионовых бактерий

оценивали на жидких модельных питательных средах. Состав этих сред одинаковый, г/1000 см³: дрожжевой автолизат – 1; хлористый кобальт – 0,01; калий фосфорнокислый однозамещенный – 1; 40 % молочная кислота – 20; пептон – 10. Отличались среды тем, что при приготовлении первой вышеуказанные компоненты вносились в водопроводную воду, а вторую среду готовили на основе гидролизованного панкреатином обезжиренного молока, разбавленного водопроводной водой в соотношении 1:2, согласно ГОСТ 33951-2016. Активную кислотность обеих сред устанавливали на уровне 6,8–7,2 гидроокисью натрия с помощью pH-метра. Измерение выделившегося газа проводили с использованием сосудов Дунбара при температуре 30 ± 1 °C, отмечая увеличение его объема каждые сутки в течение 15 суток.

Влияние активной кислотности (pH) на рост штаммов ПКБ изучали при культивировании в жидкой среде (на основе гидролизованного молока) с различными значениями pH жидкой среды. Питательную среду после приготовления доводили до pH 5,0; 5,3; 5,6; затем вносили 0,1 % 24-часовых культур на среде для пропионовых бактерий, культивирование проводили при температуре 30 ± 1 °C в течение 18 ч. Характер роста оценивали по изменению оптической плотности питательной среды на спектрофотометре КФК-3-«30МЗ» (ООО «НПП Таглер», Россия) при длине волны 600 нм.

Влияние лизоцима, нитратов и соли изучали на модельных средах с внесением лизоцима в количестве 2,5 и 5,0 г/100 кг смеси; нитратов в количестве 5, 15, 30 г/100 кг смеси; соли в концентрации от 0 до 7 %. Динамику роста ПКБ также оценивали по показателям оптической плотности, измеренным на спектрофотометре КФК-3-«30МЗ» при длине волны 600 нм.

Антагонистическую активность исследуемых культур основной и защитной заквасочной микробиоты к пропионовым бактериям определяли методом лунок на питательной среде для пропионовых бактерий. Для эксперимента отобрали штаммы *Lactococcus lactis* subsp. *lactis*, *L. cremoris*, *L. lactis* subsp. *lactis* biovar. *diacetylactis*, *Lactiplantibacillus plantarum*, *Lacticaseibacillus rhamnosus*, *Lacticaseibacillus casei*, *Lacticaseibacillus paracasei*. Для накопления жизнеспособных клеток молочнокислых бактерий использовали 10 % стерильное обезжиренное восстановленное молоко, инокулировали их 0,1 % исходной культуры и термостатировали при температуре 30 ± 1 °C в течение 18 ч. Культуры *P. freudenreichii* инокулировали 0,1 % исходной культуры и выращивали на жидкой среде для пропионовых бактерий при температуре 30 ± 1 °C в течение 48 ч. После каждого внесения культур жидкие среды перемешивали с помощью вортекса в течение 5 мин для равномерного распределения бактериальных клеток.

При определении антагонистической активности в чашку Петри вносили 1 см³ культуры *P. freudenreichii*

и заливали ее предварительно растопленной твердой средой для пропионовокислых бактерий. Далее на подсушенной поверхности чашки Петри пробочным сверлом вырезали лунки диаметром 5–7 мм и в них помещали определенное количество культур каждого штамма молочнокислых бактерий. Чашки Петри помещали в анаэробный стат и выдерживали в термостате при температуре $30 \pm 1^\circ\text{C}$ в течение 120 ч. Каждые сутки проверяли зоны ингибирования вокруг лунок.

Эффективность отобранных штаммов пропионовокислых бактерий проверяли на сырах, изготовленных в экспериментально-технологическом цехе ВНИИМС (Углич, Россия). Сыры вырабатывали по технологической схеме полутвердого сыра с низкой температурой второго нагревания, формируемого из пласта с массовой долей жира в сухом веществе 45 %. Выработки проводили из коровьего молока-сырья, полученного в хозяйстве ООО «Агри-Волга» (Ярославская обл., Россия). Молоко контролировали как по общим критериям качества, так и по специфическим критериям сыропригодности стандартизованными методами (титруемая кислотность, плотность, группа чистоты, массовая доля жира, массовая доля белка, количество спор мезофильных анаэробных лактатсбраживающих бактерий, КМАФАнМ, количество соматических клеток, ингибирующие вещества, сычужная проба). Пастеризацию молока проводили при температуре $73 \pm 1^\circ\text{C}$ с выдержкой в течение 20–25 с. Посолку отпрессованных сыров проводили в рассоле. Созревание сыров проходило в 3 стадии: 1 стадия – при температуре $11 \pm 1^\circ\text{C}$ в течение 10 суток; 2 стадия – в «теплой» камере при температуре $24 \pm 1^\circ\text{C}$ в течение 14 суток; 3 стадия – 11 дней при температуре $11 \pm 1^\circ\text{C}$.

На 5 сутки сыры после обсушки упаковывали в полимерные пакеты марки ВК 3950 с характеристиками по газопроницаемости $1750 \text{ см}^3/\text{м}^2/24 \text{ ч}/23^\circ\text{C}/0\%$ RH (ООО «Силдэйр Каустик», Россия) и оставляли созревать в течение 35 суток. Контрольные образцы сыра созревали без покрытия до 25 суток, далее их покрывали латексом и оставляли созревать в течение аналогичного периода.

При изготовлении контрольных и опытных сыров использовали основную закваску прямого внесения БК-Углич-С (экспериментальная биофабрика ВНИИМС, Углич, Россия), содержащую в своем составе *L. lactis* subsp. *lactis*, *L. cremoris*, *L. lactis* subsp. *lactis* biovar. *diacetylactis*. Отобранные по результатам исследований пропионовокислые бактерии вносили отдельно или в комбинации. В качестве защитных мер для предотвращения развития маслянокислых бактерий добавляли лизоцим в дозе 2,5 г на 100 кг молока. Для свертывания молока использовали молоко-свертывающие ферментные препараты (МФП) Chy-max Extra 600 и Chy-max Suprime 1000 (Chr. Hansen A/S, Дания).

На этом этапе объекты исследования – нормализованная молочная смесь для выработки сыра и изго-

товленные из нее контрольные и опытные сыры в процессе созревания в течение 35 суток.

Через каждые 10 суток созревания в сырах определяли количество жизнеспособных клеток пропионовокислых бактерий посевом на агар с гидролизированным молоком и молочнокислых палочек посевом на подкисленную среду MRS по ГОСТ 33951-2016.

Органолептическую оценку сыров проводили в возрасте 35 суток по ГОСТ 33630-2015 при помощи комиссии из пяти человек с квалификацией «отобранный эксперт-дегустатор».

Исследования проводили в трехкратной повторности. Для визуализации и статистической обработки полученных результатов использовали программу Microsoft Excel 2010. Для оценки статистически значимых различий между исследуемыми вариантами применяли однофакторный дисперсионный анализ ANOVA. Статистически значимый результат оценивали при $p \leq 0,05$.

Результаты и их обсуждение

Исследования по отбору штаммов пропионовокислых бактерий (ПКБ). Предположено, что причинами необразования ожидаемого рисунка в сыре могут быть как сами пропионовокислые бактерии, так и используемые технологические приемы.

В связи с этим на начальном этапе исследований важно оценить технологически значимые свойства пропионовокислых бактерий из коллекции микроорганизмов ВНИИМС (Углич, Россия) для их целевого применения в технологии полутвердых сыров с пропионовокислыми бактериями. В исследовании рассматривалось 10 штаммов – 1, 3, 7, 10, 143, 149, 225, 82810, 7676 и П, используемых для производства твердых сыров. Результаты исследования микроорганизмов с использованием метода масс-спектрометрии с применением прибора MALDI-TOF и изучение биохимической активности культур наборами для идентификации анаэробных бактерий API 20 А подтвердили принадлежность всех исследованных культур к виду *Propionibacterium freudenreichii*.

Оценка газообразующей способности изученных штаммов пропионовокислых бактерий. Сравнительный анализ газообразующей способности, проведенный ранее [15, 16], показал, что различные штаммы ПКБ начинали образовывать газ на разных сроках культивирования. Добавление в среду гидролизованного молока, содержащего более доступные источники азота для микроорганизмов, способствовало несколько раннему образованию газа у всех изученных штаммов ПКБ. Таким образом, для улучшения газообразования пропионовокислыми бактериями и, как следствие, формирования хорошо развитого рисунка сыра необходимо наличие достаточного количества пептидов и свободных аминокислот к моменту его переноса в «теплую» камеру. Степень протеолиза зависит от протеолитической активности молоко-свертывающего

фермента и заквасочной микрофлоры, поэтому можно предположить, что при производстве полутвердых сыров с использованием ПКБ необходимо выбирать ферментный препарат и / или основную заквасочную микрофлору с более выраженной протеолитической активностью.

Способность штаммов пропионовокислых бактерий образовывать газ в течение установленного периода созревания в «теплой» камере представляет особый интерес для производителей сыра. Оптимальная температура их культивирования составляет $30 \pm 1^\circ\text{C}$. Максимальное количество накопленного газа при этой температуре культивирования, обнаруженное в нашем исследовании в течение 15 дней в модельных средах, приведено на рисунке 1.

Практически все исследованные штаммы пропионовокислых бактерий проявляли более высокую актив-

ность при использовании в составе питательной среды гидролизованного молока. Кроме того, результаты экспериментов на этой среде были стабильнее и повторялись чаще, чем при исследовании на контрольной среде.

По результатам проведенной работы из изученных культур ПКБ было отобрано 6 штаммов с различной газообразующей активностью для последующего изучения и апробации в производственных условиях (П, 143, 149, 225, 7676 и 82810).

Несмотря на то что оптимальная температура развития пропионовокислых микроорганизмов составляет 30°C , в сыроделии максимальная температура созревания не превышает 25°C , а наиболее часто используемая – колеблется от 18 до 24°C [4]. В связи с этим целесообразно определить способность выбранных штаммов ПКБ образовывать газ из лактатов при указанных температурах. Данные, приведенные на рисунке 2,

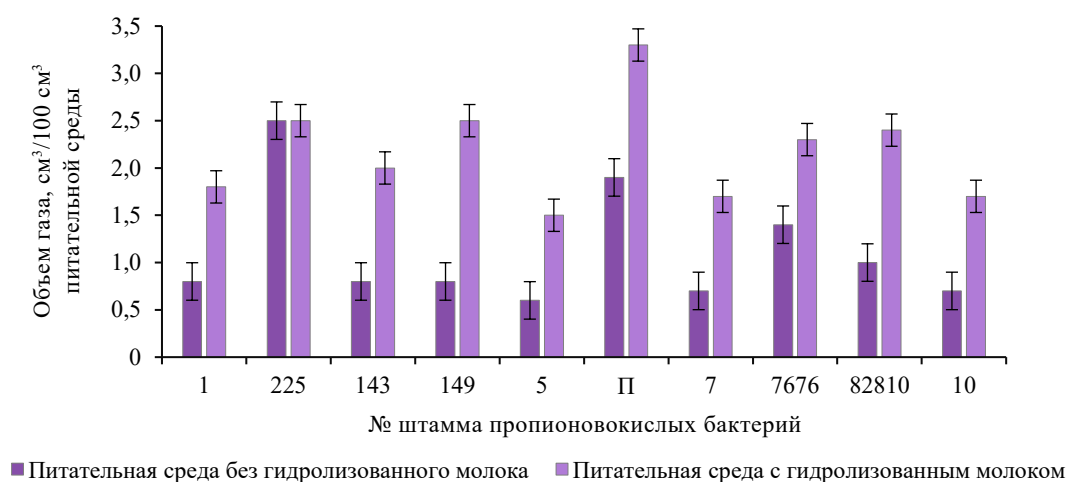


Рисунок 1. Максимальное количество выделившегося газа в течение 15 суток при температуре культивирования $30 \pm 1^\circ\text{C}$ ($n = 3$)

Figure 1. Maximal amount of gas released over 15 days at $(30 \pm 1)^\circ\text{C}$ ($n = 3$)

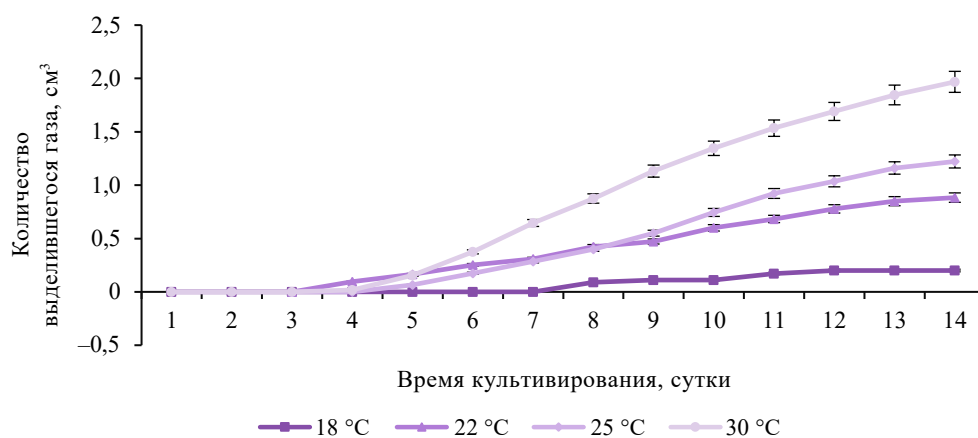


Рисунок 2. Динамика газообразования *Propionibacterium freudenreichii* в модельной питательной среде при разных температурах культивирования ($n = 18$)

Figure 2. Gas development rate by *Propionibacterium freudenreichii* in model nutrient medium at different cultivation temperatures ($n = 18$)

наглядно показывают различия в образовании газа отобранными штаммами пропионовокислых бактерий при повышении температуры культивирования (оценка газообразующей способности каждого из шести штаммов выполнена в трех повторностях).

Зависимость динамики посуточного прироста газа в сосудах Дунбара при исследованных температурах описывается линейными уравнениями с высоким уровнем аппроксимации (0,86–0,99) [15]. Коэффициент перед независимой переменной в линейной зависимости показывает скорость образования газа, см³/сутки. Скорость образования газа при снижении температуры с 30 до 25 °С уменьшалась всего в 1,4 раза, а при снижении до 22 °С – в 2,1 раза. Дальнейшее снижение температуры культивирования до 18 °С уменьшало скорость образования газа в 4,3 раза по сравнению со скоростью при 22 °С и в 9,1 раза при 30 °С. Таким образом, образование газа отобранными штаммами пропионовокислых бактерий при температурах культивирования 22–25 °С несколько ниже, чем при оптимальной температуре, что не является критичным. Вместе с тем очевидно, что использование температуры 18 °С в «теплой» камере при производстве полутвердых сыров является достаточно критичным из-за низкой скорости образования газа ПКБ. Данная температура не только препятствует образованию правильного рисунка в сыре, но и может способствовать развитию нежелательной микрофлоры в продукте ввиду высокой (по сравнению с твердыми сырами) массовой доли влаги.

Влияние активной кислотности среды на развитие пропионовокислых бактерий. Активная кислотность среды является важным фактором развития микрофлоры в сыре. Ее уровень может повлиять не только на рост пропионовокислых бактерий, но и на образование правильного рисунка в продукте.

Данные развития отобранных 6 штаммов пропионовокислых бактерий при разных уровнях активной кислотности среды (от 5,0 до 5,6 ед.) приведены на рисунке 3 на примере их культивирования при оптимальной температуре. Взятый интервал исследования обусловлен фактическими значениями активной кислотности современных полутвердых сыров в 10-суточном возрасте, т. е. перед переводом их в «теплую» камеру для активизации развития ПКБ. Однофакторный дисперсионный анализ показал отсутствие штаммовых различий в динамике развития пропионовокислых бактерий в зависимости от различного уровня pH модельной среды, поэтому на рисунке приведены средние данные по всем изученным штаммам. Максимальное стандартное отклонение составляет не более 0,012 ед. оптической плотности. Средняя точка (pH 5,3) лежит ниже прямой между крайними точками, а доверительный интервал, построенный по всем повторностям ($n = 24$), не пересекается с этой прямой. Прирост оптической плотности, отражающей динамику развития ПКБ в диапазоне pH от 5,0 до 5,3 ед. (A1), в 4,5 раза

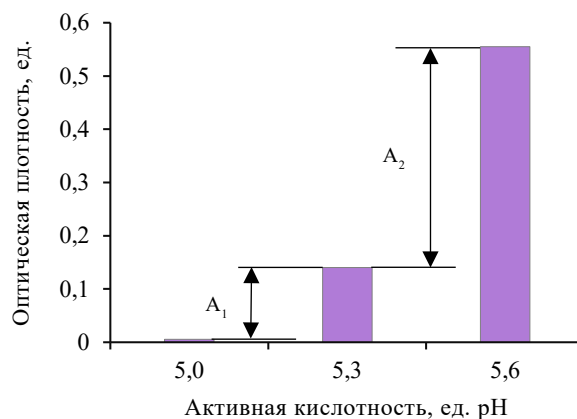


Рисунок 3. Влияние активной кислотности на развитие пропионовокислых бактерий (температура культивирования 30 ± 1 °С, зависимости построены по средним значениям, $n = 24$)

Figure 3. Effect of active acidity on propionic acid bacteria at 30 ± 1 °C, mean values ($n = 24$)

ниже прироста в диапазоне pH от 5,3 до 5,6 ед. (A2). Следовательно, с большой вероятностью можно предположить, что зависимость развития пропионовокислых бактерий от уровня активной кислотности в заданном интервале может быть описана восходящей ветвью параболы, указывающей на то, что даже при pH ниже 5,6 образование рисунка в сыре крайне затруднительно.

Полученные данные подтверждают, что уровень pH сыра критически важен для успешного роста пропионовокислых бактерий, которые отвечают за формирование рисунка, и согласуются с результатами исследований других ученых, указывающих на то, что при pH ниже 5,6 образование рисунка практически невозможно [5].

Влияние соли на развитие пропионовокислых бактерий. Применение соли в сырах играет важную роль, влияя на вкус и качество сыра. Кроме того, соль выполняет роль консерванта. Соль оказывает влияние на микрофлору в сыре за счет осмотического давления его водной фазы и вызывает дегидратацию бактериальных клеток, задержку или предотвращение их роста.

Считается, что рост пропионовокислых бактерий подавляется даже при низких содержаниях соли, на которые могут повлиять уровень pH и соотношение количества соли и влаги. Для полутвердых сыров с пропионовокислыми бактериями содержание соли в сыре обычно составляет от 0,8 до 1,3 %, т. к. соль оказывает отрицательное влияние на развитие ПКБ, образование ими углекислого газа и, соответственно, формирование рисунка в сыре.

Учитывая, что пропионовокислые бактерии являются анаэробами, ранняя упаковка сыра в полимерный материал под вакуумом может способствовать

развитию пропионовокислых бактерий по всему объему сырного матрикса. При использовании бескорковой технологии возможно образование рисунка в непосредственной близости от поверхностного слоя головки сыра, что считается пороком. Поскольку пропионовокислые бактерии имеют слабую солеустойчивость, одним из вариантов предотвращения их развития вблизи поверхности сыра может быть создание временной высокой концентрации соли в поверхностном слое головки и использование штаммов ПКБ, наиболее чувствительных к повышению концентрации NaCl. Для этого проведены исследования способности коллекционных штаммов *P. freudenreichii* развиваться и образовывать углекислый газ в среде с повышенной концентрацией соли.

На рисунке 4 показано развитие штаммов пропионовокислых бактерий при температуре 30 °С в течение 16 ч. Наиболее чувствительным к концентрации соли оказался штамм 225. Как отмечалось ранее, для образования рисунка в сыре важна не только степень развития, но и способность культур пропионовокислых бактерий образовывать газ, поэтому проведено исследование влияние NaCl на образование газа.

Не все штаммы отобранных ПБК одинаково реагировали на повышение концентрации соли в части их развития и газообразования. Есть предположения, что комбинация штаммов 149 и 225 при выработке сыра с временно повышенным градиентом соли на поверхности может снизить риск образования нежелательного рисунка в бескорковом сыре близко к поверхности продукта.

К моменту перевода в «теплую» камеру в сыре образуется много лактатов в результате активного развития основной заквасочной микробиоты и достаточно сильно снижается окислительно-восстановительный потенциал. Эти два фактора и повышенная

температура создают благоприятные условия для развития маслянокислых бактерий. Единственным сдерживающим фактором их развития является активная кислотность. Так, маслянокислые бактерии самого опасного для сыроделия вида *Clostridium tyrobutyricum* практически не развиваются при pH ниже 5,5. Однако эти значения активной кислотности, как показано выше, являются неблагоприятными и для развития пропионовокислых бактерий.

Кроме того, применение повышенных температур созревания («теплая» камера) способствует автолизу молочнокислой микробиоты и, как следствие, повышению pH в продукте. Таким образом, риск маслянокислого брожения в полутвердых сырах с ПКБ очень высокий. Это связано с тем, что пропионовокислые и маслянокислые бактерии в сыре конкурируют за лактаты, которые служат им источником энергии. Споры клостридий, выживающие после пастеризации, прорастают и перерабатывают лактат, производя избыточное количество масляной и уксусной кислот, водорода и углекислого газа. Это приводит к позднему вспучиванию сыра, появлению нетипичного слащаво-прогорклого вкуса с резким запахом масляной кислоты, а также к деформации и даже разрыву головок [17, 18].

Для предотвращения маслянокислого брожения на практике используют превентивные меры, снижающие риски порчи продукта. Кроме бактофугирования применяют внесение лизоцима [19] и нитратов, а также защитных культур, обладающих специфическим антагонистическим действием в отношении маслянокислых бактерий. Необходимо, чтобы отобранные штаммы проявляли устойчивость к указанным внешним факторам, в противном случае результат их стабильного развития и образования типичных вкусовых характеристик и рисунка будет труднодостижимым.

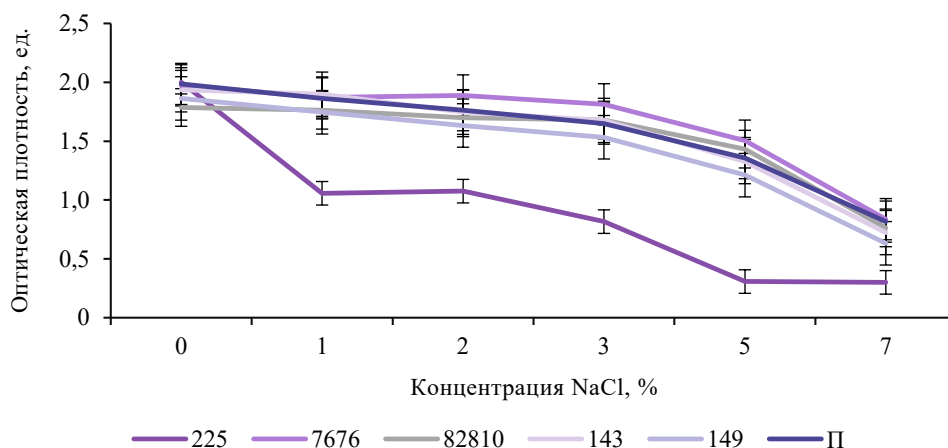


Рисунок 4. Влияние различных концентраций хлорида натрия на развитие штаммов пропионовокислых бактерий (график построен по средним значениям показателя, $n = 3$)

Figure 4. Effect of NaCl concentration on propionic acid bacteria at 30 ± 1 °C, mean values ($n = 3$)

Влияние лизоцима на развитие пропионово-кислых бактерий. В таблице 1 представлены результаты исследования влияния различных концентраций лизоцима на развитие пропионовокислых бактерий в модельных питательных средах. В эксперименте использовали рекомендованные в сыроделии дозы лизоцима и дозу, вдвое ее превышающую.

Полученные данные показали, что лизоцим в дозе 2,5 г/100 л оказал незначительное влияние на развитие отобранных штаммов пропионовокислых бактерий и может быть безопасно использован при производстве сыров с их участием.

Влияние нитратов на развитие пропионово-кислых бактерий. В таблице 2 представлены результаты исследования влияния нитратов на развитие пропионовокислых бактерий в модельных питательных средах с различными концентрациями нитратов, соответствующими обычным для сыроделия дозировкам.

Исследование выявило штамм-специфические различия в реакции пропионовокислых бактерий на уве-

личение концентрации нитратов. В то время как концентрация 5 г/100 л не оказывала ингибирующего эффекта на рост исследованных штаммов, концентрация 15 и 30 г/100 л приводила к значительному снижению роста штамма 225 (на 39,1 %), но не влияла на рост штамма 82810. Полученные данные подчеркивают необходимость учета штаммовой вариабельности в устойчивости к нитратам при подборе заквасочных культур для сыров с пропионовокислыми бактериями.

Влияние защитных культур на развитие пропионовокислых бактерий. В качестве защитных культур для предотвращения развития маслянокислых бактерий в российском сыроделии чаще всего используются *Lactiplantibacillus plantarum*, *Lacticaeibacillus rhamnosus*, *Lacticaeibacillus casei*, *Lacticaeibacillus paracasei* [20, 21]. Данных об их влиянии на развитие пропионовокислых бактерий не обнаружено, поэтому интерес представляло изучение данного вопроса.

Таблица 1. Развитие пропионовокислых бактерий в модельных питательных средах с различной концентрацией лизоцима к 8 ч культивирования

Table 1. Propionic acid bacteria in model nutrient media with different concentrations of lysozyme after 8 h of cultivation at 600 nm, units of optical density

Штамм пропионовокислых бактерий	Оптическая плотность при длине волны 600 нм, ед.		
	Отсутствует (контроль)	2,5 г/100 л	5,0 г/100 л
225	0,638 ± 0,008 ^a	0,629 ± 0,008 ^a	0,594 ± 0,020
149	0,689 ± 0,002 ^a	0,681 ± 0,003 ^a	0,666 ± 0,010
143	0,777 ± 0,009	0,752 ± 0,009	0,747 ± 0,020
П	0,882 ± 0,009	0,822 ± 0,014	0,786 ± 0,017
7676	0,514 ± 0,009 ^a	0,501 ± 0,008 ^a	0,495 ± 0,008
82810	0,934 ± 0,016 ^a	0,925 ± 0,009 ^a	0,916 ± 0,014

Примечание: показатели, обозначенные в таблице буквами, не имеют достоверных различий ($p > 0,1$), остальные существенно различаются с контролем.

Note: the indicators with superscripts have no reliable differences ($p > 0.1$); the rest differ significantly from the control.

Таблица 2. Развитие пропионовокислых бактерий в модельных питательных средах с различной концентрацией нитратов к 8 ч культивирования

Table 2. Propionic acid bacteria in model nutrient media with different concentrations of nitrates after 8 h of cultivation at 600 nm, units of optical density

Штамм пропионовокислых бактерий	Оптическая плотность при длине волны 600 нм, ед.			
	Отсутствует (контроль)	5 г/100 л	15 г/100 л	30 г/100 л
225	0,578 ± 0,021 ^a	0,538 ± 0,071	0,391 ± 0,071 ^a	0,352 ± 0,072 ^a
149	0,702 ± 0,002 ^a	0,689 ± 0,002	0,576 ± 0,091 ^a	0,527 ± 0,066 ^a
143	0,796 ± 0,021 ^a	0,771 ± 0,016	0,720 ± 0,029 ^a	0,673 ± 0,033 ^a
П	0,921 ± 0,014 ^a	0,896 ± 0,024	0,814 ± 0,072 ^a	0,752 ± 0,015 ^a
7676	1,038 ± 0,011 ^a	0,981 ± 0,011	0,931 ± 0,087 ^a	0,883 ± 0,067 ^a
82810	1,023 ± 0,004	1,109 ± 0,002	1,094 ± 0,004	1,019 ± 0,006

Примечание: значения показателей при добавлении нитратов, обозначенные одинаковой буквой, имеют существенные различия с контролем ($p < 0,05$).

Note: the post-nitrate values with the same superscript differ significantly from the control ($p < 0.05$).

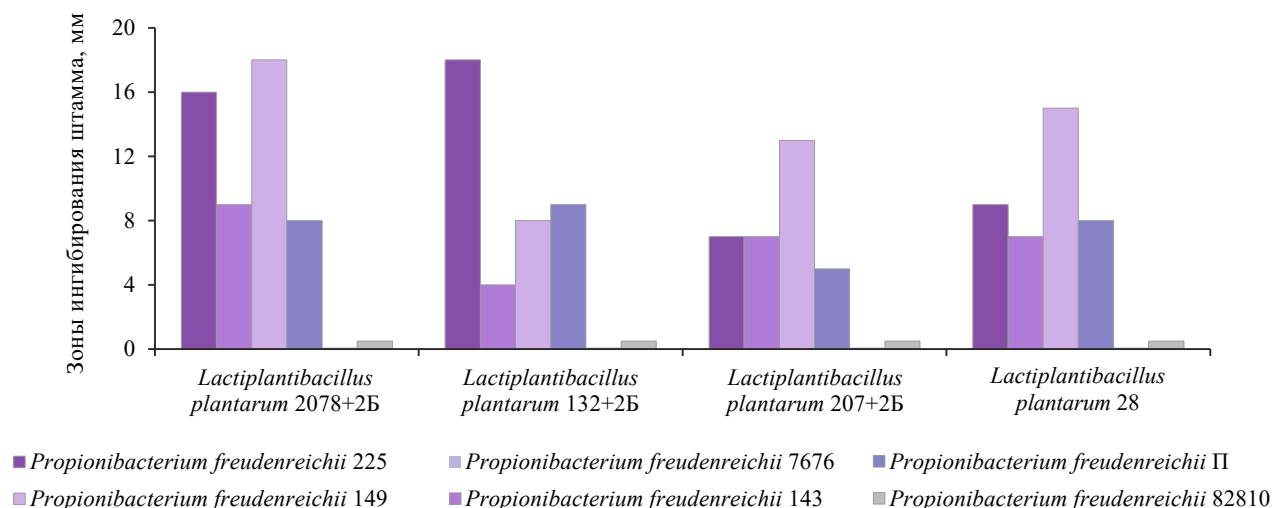


Рисунок 5. Антагонистическая активность *Lactiplantibacillus plantarum* к пропионовокислым бактериям (зависимости построены по средним значениям, $n = 3$, отклонения от среднего составляют 5–10 отн.%)

Figure 5. Antagonistic activity of *Lactiplantibacillus plantarum* to propionic acid bacteria (mean values, $n = 3$, deviations from mean 5–10 rel.%)

Данные о влиянии *L. plantarum* из коллекции экспериментальной биофабрики ВНИИМС на развитие перспективных для сыроделия штаммов пропионовокислых бактерий показаны на рисунке 5.

L. plantarum оказывал достаточно сильное влияние на рост и развитие пропионовокислых бактерий, подавляя их развитие. Наиболее выраженное ингибирующее действие проявили штаммы *L. plantarum* 2078+2Б и 132+2Б, у которых зоны ингибирования отдельных штаммов пропионовокислых бактерий (149 и 225) составили 18 и 16 мм соответственно. *L. plantarum* наименьшее влияние оказал на штаммы 7676 и 82810.

Таким образом, при подборе штаммов ПКБ в состав заквасочной микробиоты для производства сыра необходимо учитывать наличие антагонизма к *L. plantarum*, если он присутствует в составе бактериальных концентратов.

В сыроделии, кроме *L. plantarum*, в качестве защитных культур используют *L. rhamnosus*, *L. casei*, *L. paracasei* [22, 23]. В эксперименте протестированы 6 случайно отобранных штаммов этих защитных культур на предмет их антагонистической активности в отношении пропионовокислых бактерий с применением луночного метода. Не все исследованные штаммы защитных культур демонстрировали ингибирующее воздействие на рост пропионовокислых бактерий. Частота проявления антагонизма между штаммами *L. rhamnosus*, *L. casei*, *L. paracasei* и *P. freudenreichii* представлена на рисунке 6.

Исследованные штаммы *L. rhamnosus*, *L. casei* и *L. paracasei* оказывают различное, но частичное ингибирующее воздействие на рост пропионовокислых бактерий. Штаммы *P. freudenreichii* 149 и 7676

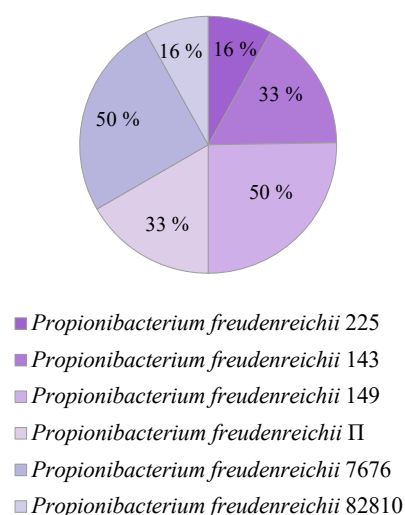


Рисунок 6. Частота встречаемости антагонизма к пропионовокислым бактериям со стороны защитных культур, используемых в сыроделии в отношении маслянокислых бактерий (зависимости построены по средним значениям, $n = 3$)

Figure 6. Antagonism rate to propionic acid bacteria from protective cultures used in cheese production against butyric acid bacteria (mean values, $n = 3$)

оказались наиболее чувствительными к этому воздействию, в то время как штаммы 82810 и 225 проявили наибольшую устойчивость.

Ввиду того, что обнаружен достаточно сильный антагонизм защитных культур в отношении пропионовокислых бактерий, возник вопрос, способна ли основная заквасочная микробиота повлиять на их развитие при производстве сыра.

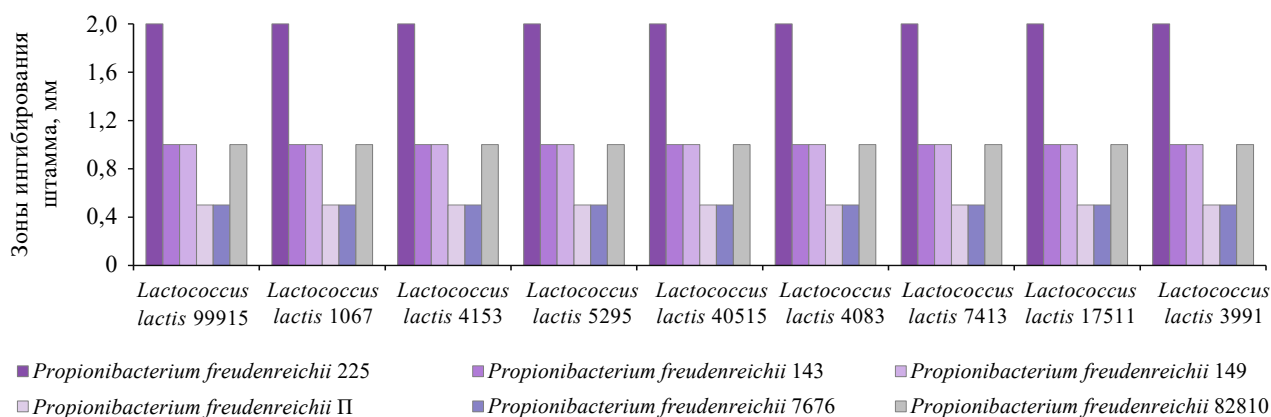


Рисунок 7. Антагонистическая активность *Lactococcus lactis* subsp. *lactis* к пропионовокислым бактериям (зависимости построены по средним значениям, n = 3, отклонения от среднего составляют 5–10 отн.%)

Figure 7. Antagonistic activity of *Lactococcus lactis* subsp. *lactis* to propionic acid bacteria (mean values, n = 3, deviations from mean 5–10 rel.%)

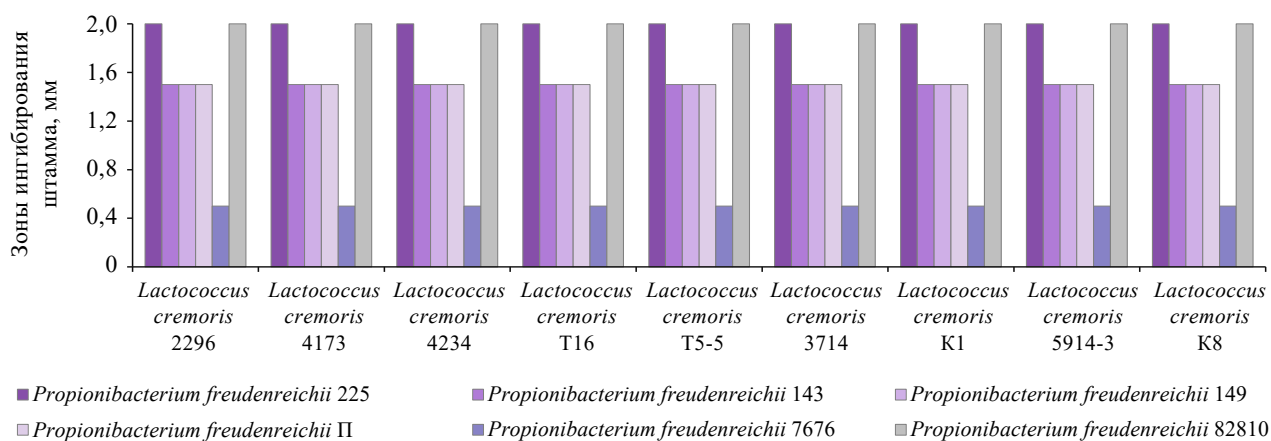


Рисунок 8. Антагонистическая активность *Lactococcus cremoris* к пропионовокислым бактериям (зависимости построены по средним значениям, n = 3, отклонения от среднего составляют 5–10 отн.%)

Figure 8. Antagonistic activity of *Lactococcus cremoris* to propionic acid bacteria (mean values, n = 3, deviations from mean 5–10 rel.%)

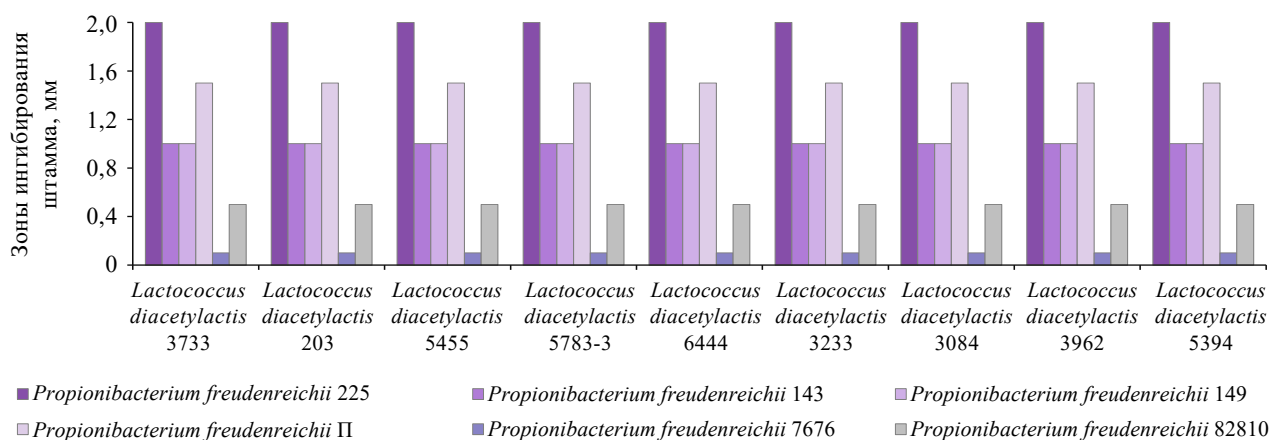


Рисунок 9. Антагонистическая активность *Lactococcus lactis* subsp. *lactis* biovar. *diacetylactis* к пропионовокислым бактериям (зависимости построены по средним значениям, n = 3, отклонения от среднего составляют 5–10 отн.%)

Figure 9. Antagonistic activity of *Lactococcus lactis* subsp. *lactis* biovar. *diacetylactis* to propionic acid bacteria (mean values, n = 3, deviations from mean 5–10 rel.%)

Влияние основного состава микробиоты сыра на развитие пропионовокислых бактерий. В состав основной закваски для выработки сыров с пропионовокислыми бактериями входят *L. lactis* subsp. *lactis*, *L. cremoris*, *L. lactis* subsp. *lactis* biovar. *diacetylactis*.

Результаты изучения антагонистической активности различных видов лактококков в отношении пропионовокислых бактерий представлены на рисунках 7–9.

В ходе исследования отмечено, что лактококки обладают низкой антагонистической активностью в отношении пропионовокислых бактерий на начальной стадии развития. Причем уровень антагонизма присутствовал у всех исследованных культур, а степень угнетения развития зависела от вида микроорганизма. Внутри вида антагонизм носил штамм-специфический характер. Кроме того, в процессе проведения исследования зафиксировано, что выявленный антагонизм на начальной стадии исследования в дальнейшем переходил в синергизм, повышая плотность популяции как лактококков, так и пропионовокислых бактерий.

Приведенные результаты исследования на модельных средах подтвердили высокую способность отобранных штаммов *P. freudenreichii* к газообразованию в условиях наличия продуктов протеолиза и уровня pH среды 5,6. Динамика их развития несущественно зависит от влияния лизоцима и существенно от нитратов. Отдельные виды защитной микробиоты способны

оказать негативное влияние на развитие ПБК, а влияние микробиоты основной заквасочной микробиоты носит преимущественно антагонистический характер на начальной стадии и синергетический характер на более поздних стадиях развития ПБК. Установленные зависимости следует проверить на сырах.

Изучение динамики развития пропионовокислых бактерий в полутвердых сырах с низкой температурой второго нагревания и его влияния на формирование показателей качества продукта. Образцы сыров вырабатывали из коровьего молока с характеристиками (табл. 3), соответствующими требованиям к сыропригодному молоку [24–27].

Влияние протеолитической активности молоко-свертывающих ферментных препаратов. Используемые в выработках молоко-свертывающие ферментные препараты (МФП) имели близкую молоко-свертывающую активность, но отличались протеолитической активностью. По данным [10, 11] Chy-max Extra 600 имел протеолитическую активность, определенную по ГОСТ 34430-2018, в 1,7 раза выше, чем протеолитическая активность Chy-max Suprime 1000 (0,48 ед. ПА/г против 0,28 ед. ПА/г).

Динамика развития пропионовокислых бактерий по ходу процесса изготовления сыра приведена в таблице 4.

Уровень развития пропионовокислых бактерий в двух сырах не изменялся, пока сыр находился в камере

Таблица 3. Показатели безопасности и сыропригодности молока-сырья, используемого для экспериментальных выработок сыров

Table 3. Safety and cheese-making properties of raw milk in experimental cheese production

Показатель	Экспериментальные данные	Требования СТО ВНИИМС 019-2019 (молоко для сыроделия)	Требования ТР ТС 033/2013
Массовая доля, %:			
жира	4,70–4,80	не менее 3,2	не менее 2,8
белка	3,32–3,40	не менее 3,0	не менее 2,8
СОМО	8,78–8,90	не менее 8,2	не менее 8,2
лактозы	4,75–4,85	не нормируется	не нормируется
минеральных солей	0,73–0,76	не нормируется	не нормируется
Плотность, кг/м ³	1029,0–1029,5	не менее 1027,0	не менее 1027,0
Точка замерзания, °С	минус 0,558–0,600	не выше минус 0,520	не выше минус 0,505
Количество соматических клеток, тыс. клеток/см ³	318,0–370,0	не более 400	не более 750
Ингибирующие вещества	отсутствуют	не допускаются	не допускаются
Антибиотики	отсутствуют	не допускаются	не допускаются
Сычужная проба, класс	I	I–II	не нормируется
КМАФАнМ, КОЕ/см ³	1,9×10 ⁴ –2,2×10 ⁴	не более 3×10 ⁵	не более 5×10 ⁵
Количество спор МАНЛМо, НВЧ спор/см ³	1,0×10 ¹ –1,5×10 ¹	не более 13	не нормируется
Количество спор аэробных микроорганизмов, спор/см ³	7,0×10 ¹ –7,4×10 ¹	не более 10 ²	не нормируется
Дрожжи, КОЕ/см ³	3,0×10 ¹ –3,2×10 ¹	не более 10 ²	не нормируется
Плесневые грибы, КОЕ/см ³	3,7×10 ¹ –3,9×10 ¹	не нормируется	не нормируется

Примечание: МАНЛМо – мезофильные анаэробные лактатсбраживающие маслянокислые микроорганизмы.

Note: МАНЛМо – mesophilic anaerobic lactate-fermenting butyric acid microorganisms.

Таблица 4. Микробиологические показатели, характеризующие технологический процесс производства и созревания сыров (n = 3)

Table 4. Microbiological technological indicators of cheese production and ripening (n = 3)

Сырье	КМАФАнМ, КОЕ/см ³ (г)	Цитратсбраживающие микроорганизмы, КОЕ/см ³ (г)	Пропионовокислые бактерии, КОЕ/см ³ (г)	БГКП, наличие / отсутствие в массе продукта	Количество спор МАНЛМо, КОЕ/см ³ (г)
Смесь после заквашивания					
1	2,4×10 ⁵ –5,0×10 ⁶	4,0×10 ⁴ –9,3×10 ⁵	1,3×10 ⁴ –4,2×10 ⁴	–	–
2	2,3×10 ⁵ –2,6×10 ⁵	1,6×10 ⁶ –3,0×10 ⁴	1,0×10 ⁴ –6,2×10 ⁴	–	–
Сыры после прессования					
1	1,0×10 ⁷ –1,2×10 ⁸	2,3×10 ⁶ –7,0×10 ⁷	6,7×10 ⁴ –3,6×10 ⁵	отсутствует в 0,1 г	–
2	1,1×10 ⁷ –1,4×10 ⁸	2,2×10 ⁶ –5,2×10 ⁷	5,9×10 ⁴ –3,2×10 ⁵	отсутствует в 0,1 г	–
Сыры после 10 суток созревания					
1	1,8×10 ⁹ –2,7×10 ⁹	1,4×10 ⁷ –7,3×10 ⁸	5,7×10 ⁵ –2,9×10 ⁶	отсутствует в 0,1 г	–
2	2,2×10 ⁹ –2,8×10 ⁹	3,8×10 ⁷ –6,7×10 ⁸	7,6×10 ⁵ –2,0×10 ⁶	отсутствует в 0,1 г	–
Сыры после 25 суток созревания					
1	2,9×10 ⁷ –2,9×10 ⁷	1,0×10 ⁷ –1,1×10 ⁷	6,1×10 ⁸ –6,3×10 ⁸	отсутствует в 0,1 г	отсутствует
2	1,3×10 ⁸ –1,1×10 ⁸	8,3×10 ⁷ –8,5×10 ⁷	1,9×10 ⁸ –2,1×10 ⁷	отсутствует в 0,1 г	отсутствует
Сыры после 35 суток созревания					
1	2,3×10 ⁷ –5,8×10 ⁸	1,5×10 ⁶ –6,0×10 ⁶	1,4×10 ⁸ –6,7×10 ⁸	отсутствует в 0,1 г	отсутствует
2	1,4×10 ⁸ –5,8×10 ⁸	3,4×10 ⁶ –5,1×10 ⁷	2,5×10 ⁸ –1,0×10 ⁸	отсутствует в 0,1 г	отсутствует

Примечание: вариант 1 – сыр, выработанный с использованием молокосвертывающего фермента Chy-max Extra 600; вариант 2 – сыр, выработанный с использованием молокосвертывающего фермента Chy-max Suprime 1000; МАНЛМо – мезофильные анаэробные лактатсбраживающие маслянокислые микроорганизмы.

Note: 1 – cheese from Chy-max Extra 600 milk-clotting enzyme; 2 – cheese from Chy-max Suprime 1000 milk-clotting enzyme; МАНЛМо – mesophilic anaerobic lactate-fermenting butyric acid microorganisms.

предварительного созревания при температуре 10 °С и оставался на уровне $(3,6 \pm 0,6) \times 10^5$ КОЕ/г, что соответствует имеющимся знаниям о минимальной температуре развития пропионовокислых бактерий [13]. Разница в развитии пропионовокислых бактерий проявилась с момента перемещения сыра в «теплую» камеру, т. е. с 10 по 25 сутки созревания. Статистически изменения в развитии пропионовокислых бактерий начали происходить через 5 суток нахождения сыра в теплой камере, что объясняется прогревом головок сыра до температуры 24 °С. Динамика развития *P. freudenreichii* с 15 по 25 сутки созревания приведена на рисунке 10.

Пропионовокислые бактерии в сырах, выработанных с молокосвертывающим препаратом Chy-max Extra 600, после 15 суток начали развиваться быстрее и к концу нахождения сыра в «теплой» камере, т. е. к 25 суткам созревания, достигли содержания жизнеспособных клеток $(3,7 \pm 0,1) \times 10^8$ КОЕ/г. В сыре, выработанном с ферментом Chy-max Suprime 1000, содержание пропионовокислых бактерий к 25 суткам созревания

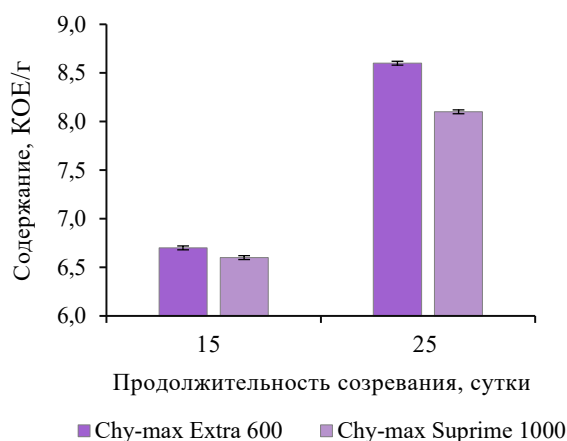


Рисунок 10. Динамика развития пропионовокислых бактерий в сыре при нахождении его в «теплой» камере (зависимости построены по средним значениям, n = 3)

Figure 10. Dynamics of propionic acid bacteria development in cheese when it is in a "warm" chamber (mean values, n = 3)

достигало уровня $(1,5 \pm 0,1) \times 10^8$ КОЕ/г. Таким образом, в сыре, выработанном с МФП с более высоким уровнем протеолиза, количество пропионовокислых бактерий к концу нахождения в «теплой» камере превышало аналогичный показатель в сыре, изготовленном с МФП с более низким уровнем протеолиза более чем в 2 раза. Это подтверждают ранее проведенные исследования на модельных средах [15], согласно которым для активного развития пропионовокислых бактерий требуются азотистые вещества в доступной форме, обеспечиваемые за счет использования фермента с более высокой протеолитической активностью.

Влияние способа созревания на формирование качества полутвердого сыра с низкой температурой второго нагревания с пропионовокислыми бактериями. Проведены выработки сыра с разными способами созревания (бескорковое и традиционное), имеющие некоторые различия. При традиционном созревании сыр после посолки перемещали на обсушку и далее в камеру созревания, где до 25 суток он находился без покрытия при разных режимах в камерах созревания (до 10 суток при температуре 11 ± 1 °C, затем с 11 по 25 сутки при температуре 24 ± 1 °C). После сыр покрывали латексом и подвергали созреванию в течение 35 суток. Созревание бескоркового сыра проходило в 3 стадии: 1 стадия – при температуре 11 ± 1 °C в течение 10 суток; 2 стадия – в «теплой» камере при температуре 24 ± 1 °C в течение 14 суток; 3 стадия – при температуре 11 ± 1 °C в течение 11 дней. Сыры после обсушки упаковывали на 5 суток в полимерные пакеты марки ВК 3950 (характеристики по газопроницаемости $1750 \text{ см}^3/\text{м}^2/24 \text{ ч}/23 \text{ °C}/0 \% \text{ RH}$). Они созревали в течение 35 суток.

Результаты органолептической экспертной оценки сыров в процессе созревания в возрасте 35 суток отражены в таблице 5.

Сыр, выработанный по бескорковой технологии, обладал более эластичной консистенцией и выраженным сладковатым вкусом, в отличие от сыра традиционной технологии. Предположительно, это связано с равномерным распределением влаги в сырах, выработанных по бескорковой технологии, что способствовало более активному развитию пропионовокислых бактерий.

По физико-химическим показателям сыры после пресса, выработанные по разным технологиям, не имели значительного отличия (табл. 6). Фотографии зрелого сыра представлены на рисунках 11 и 12.

Пропионовокислые бактерии – анаэробы. При бескорковом созревании в результате вакуумирования создаются анаэробные условия. Высокое содержание влаги в продукте совместно с другими подходящими условиями (температура, сниженный окислительно-восстановительный потенциал, достаточное наличие лактатов) создают возможности для быстрого развития и, следовательно, газообразования пропионовокислых бактерий по всей массе сыра, в т. ч. близко к поверхности (рис. 13). Подобное развитие рисунка производителями сыра квалифицируется как брак [28–30]. Следовательно, необходимо найти решение для снижения активности пропионовокислого брожения в поверхностном слое. Учитывая, что некоторые штаммы ПКБ очень чувствительны к соли, целесообразно выявить варианты временного повышения градиента концентрации соли в поверхностном слое. Для этого проведены исследования и изменен режим посолки сыра в рассоле в последние часы.

Таблица 5. Органолептическая оценка сыра по традиционной (вариант 1) и бескорковой (вариант 2) технологиям ($n = 3$)

Table 5. Sensory profile: Traditional (1) vs. rindless (2) cheese ($n = 3$)

Вариант сыра	Вкус и запах (45)		Консистенция (25)		Рисунок (10)		Внешний вид (10)		Общий балл
	Характеристика	Балл	Характеристика	Балл	Характеристика	Балл	Характеристика	Балл	
1	Умеренно выраженный сырный, слегка сладковатый, пряный	42 ± 1	Эластичная	23 ± 1	Глазки крупной и овальной формы, равномерно расположены по всей массе	10 ± 0	Корка прочная, ровная, без повреждений	10 ± 0	95 ± 2
2	Умеренно выраженный сырный, слегка сладковатый, пряный	43 ± 1	Эластичная, однородная по всей массе	24 ± 1	Глазки крупной и овальной формы, равномерно расположены по всей массе	10 ± 0	Корка прочная, ровная, без повреждений	10 ± 0	97 ± 3

Таблица 6. Физико-химические показатели сыров после пресса ($n = 3$)

Table 6. Physicochemical parameters of cheese after pressing ($n = 3$)

Способ созревания сыра	Массовая доля влаги, %	Активная кислотность, ед. pH	Массовая доля жира в сухих веществах, %
Корковое созревание	$46,1 \pm 0,2$	$6,00 \pm 0,02$	$45,0 \pm 0,3$
Бескорковое созревание	$46,0 \pm 0,3$	$6,10 \pm 0,02$	$44,9 \pm 0,2$



Рисунок 11. Сыр, выработанный по бескорковой технологии в кондиционной зрелости 35 суток

Figure 11. Rindless cheese, 35 days



Рисунок 12. Сыр, выработанный по корковой технологии в кондиционной зрелости 35 суток

Figure 12. Traditional cheese, 35 days



Рисунок 13. Развитие пропионовокислых бактерий у поверхности сырной головки

Figure 13. Propionic acid bacteria on cheese wheel surface

Результаты исследования, включавшие упаковку сыра в полимерную пленку, посолку в более концентрированном рассоле в последние 3 ч и наблюдение за формированием рисунка, подтвердили, что посолка сыра в концентрированном растворе соли подавляет развитие пропионовокислых бактерий. В результате в опытной группе сыров наблюдалось меньшее образование пустот в подкорковом слое по сравнению с контрольной группой (рис. 14).

Использование концентрированного рассола для посолки сыра привело к значительному уменьшению количества глазков в подкорковом слое. По сравнению с традиционным методом посолки в полимерной упаковке количество глазков снизилось вдвое. По сравнению с контрольным образцом снижение составило 30 %. Это указывает на то, что изменение способа посолки может быть эффективным методом контроля рисунка сыра, особенно в подкорковом слое, и позволит улучшить качество выпускаемого сыра и минимизировать брак в процессе его производства.

Выводы

При подборе штаммов пропионовокислых бактерий (ПКБ) для производства сыра необходимо учитывать их газообразующую способность.

Для активного газообразования некоторых штаммов пропионовокислых бактерий требуются азотистые вещества в доступной форме. Скорость и начало газо-

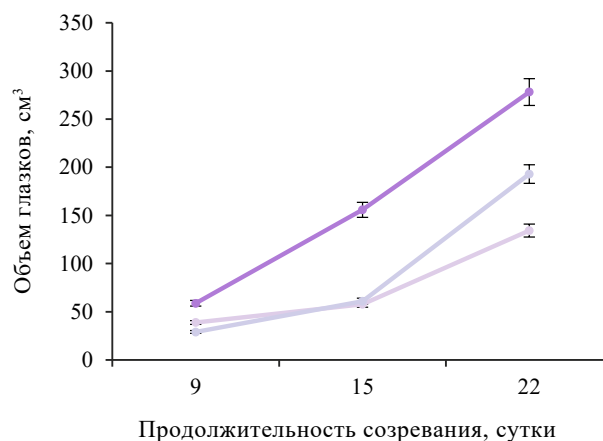


Рисунок 14. Образование газа в подкорковом слое 2 см сыра в процессе созревания при температуре 24 °C (зависимости построены по средним значениям, n = 3)

Figure 14. Gas formation in sub-cortical layer at 24 °C (mean values, n = 3)

образования зависят от содержания пептидных форм азота, что необходимо учитывать при подборе ферментных препаратов и основной заквасочной микрофлоры, обладающих протеолитической активностью.

Активная кислотность сыра ниже 5,6 ед. является критическим фактором развития пропионовокислых бактерий в процессе созревания продукта и, как следствие, правильного образования рисунка в нем.

Лизоцим в дозе 2,5 г/100 л молока не оказывает негативного влияния на развитие пропионовокислых бактерий и может быть безопасно использован при производстве сыров с их участием.

Нитраты в количестве 15–30 г/100 л молока в большинстве случаев снижают скорость развития многих штаммов пропионовокислых бактерий. Степень

устойчивости пропионовокислых бактерий к нитратам определяется штаммовой особенностью.

Культуры *Lactiplantibacillus plantarum* ингибируют рост штаммов пропионовокислых бактерий. Их использование в составе закваски может замедлить развитие ПКБ, что может привести к ухудшению органолептических показателей сыра, в т. ч. к формированию плохо развитого рисунка.

Штаммы исследованных защитных культур *Lactocaseibacillus rhamnosus*, *Lactocaseibacillus casei*, *Lactocaseibacillus paracasei* оказывают избирательное антагонистическое действие на некоторые штаммы пропионовокислых бактерий. Данный факт необходимо учитывать при подборе культур в состав заквасок и использовании их при производстве сыра.

Антагонистическая активность лактококков к пропионовокислым бактериям носит штамм-специфический характер.

Созревание сыра с пропионовокислыми бактериями в полимерных пакетах влияет на развитие рисунка в сырном матриксе.

Использование концентрированного рассола на заключительном этапе посолки сыра привело к значительному уменьшению количества глазков в подкорковом слое.

По результатам исследований отобрано 6 перспективных штаммов *Propionibacterium freudenreichii* для использования в производстве полутвердых сыров – П, 143, 149, 225, 7676 и 82810.

Перспективным направлением продолжения исследований является изучение пробиотических свойств отобранных штаммов *P. freudenreichii* и выявление проявления этих свойств в сырах.

Критерии авторства

Г. Н. Рогов – организация и руководство проведением исследований, анализ литературы и результатов экспериментов, написание статьи. Т. С. Смирнова – проведение экспериментов, обработка результатов, написание статьи. Е. В. Топникова – участие в написании статьи и анализе результатов.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарности

Авторы выражают благодарность коллективам отдела микробиологических исследований и экспериментального цеха по производству сыров ВНИИМС за помощь в проведении исследования.

Contribution

G.N. Rogov supervised the research, wrote the review, formulated the results, and drafted the manuscript. T.S. Smirnova conducted the experiments, processed the results, and drafted the manuscript. E.V. Topnikova drafted the manuscript and analyzed the results.

Conflict of interest

The authors state that there is no conflict of interest.

Acknowledgments

The authors would like to thank the teams of the Microbiological Research Department and the experimental work-shop of the All-Russian Research Institute of Butter and Cheese Production for their assistance.

Список литературы / References

1. Мордвинова В. А. Актуальные вопросы ассортиментной политики сыродельного предприятия. Сыроделие и маслоделие. 2021. № 5. С. 8–9. [Mordvinova VA. Actual questions of assortment policy of a cheese making enterprise. Cheese- and Buttermaking. 2021;(5):8–9. (In Russ.)] <https://doi.org/10.31515/2073-4018-2021-5-8-9>
2. Сурай Н. М., Таточенко А. Л., Терехова А. А., Михалев А. П., Корнева Г. В. Регионы-лидеры сыроделия: создание собственных сырных брендов и их трансформация в бренды территорий. Сыроделие и маслоделие. 2024. № 1. С. 10–25. [Suray NM, Tatochenko AL, Terekhova AA, Mikhalev AP, Korneva GV. Cheese-making regions: From local cheese varieties to regional brands. Cheese- and Buttermaking. 2024;(1):10–25. (In Russ.)] <https://doi.org/10.21603/2073-4018-2024-1-2>
3. Джафарова А. Потребление сыров в России сегодня – изменения в предпочтениях. Сыроделие и маслоделие. 2018. № 1. С. 8–9. [Djafarova A. Consumption of cheese in Russia today – Changes in preferences. Cheese- and Buttermaking. 2018;(1):8–9. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/YPAQWX>
4. МакСуини П. Л. Г., Фокс П. Ф., Коттер П. Д., Эверетт Д. У. Сыр. Научные основы и технологии. Том 2. Технологии основных групп сыров. СПб.: Профессия, 2019. С. 287–308. [McSweeney PLG, Fox PF, Cotter PD, Everett DU. Cheese: Chemistry, Physics and Microbiology. Vol. 2. General aspects. St. Petersburg: Professiya; 2019. pp. 287–308. (In Russ.)]
5. МакСуини П. Л. Г. Практические рекомендации сыроделам. СПб.: Профессия, 2011. С. 243–262. [McSweeney PLG. Practical Recommendations for Cheesemakers. St. Petersburg: Professiya; 2011. pp. 243–262. (In Russ.)]
6. Рогов Г. Н. Упаковка бескорковых сыров: практические советы из многолетнего опыта. Сыроделие и маслоделие. 2023. № 2. С. 25–27. [Rogov GN. Packaging of rindless cheeses: Practical tips from many years of experience. Cheese- and Buttermaking. 2023;(2):25–27. (In Russ.)] <https://doi.org/10.31515/2073-4018-2023-2-25-27>

7. Мордвинова В. А., Свириденко Г. М. Факторы, влияющие на качество сыров типа «Маасдам». Сыроделие и маслоделие. 2015. № 3. С. 28–30. [Mordvinova VA, Sviridenko GM. The factors effecting quality of the cheese of the “Maasdam” type. Cheese- and Buttermaking. 2015;(3):28–30. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/TWRPKL>
8. Fröhlich-Wyder M-T, Bachmann HP, Bisig W, Fritsch L, Fuchsmann P, et al. Cheeses with propionic acid fermentation. In: McSweeney PLH, Cotter PD, Everett DW, Govindasamy-Lucey R, editors. Cheese: Chemistry, Physics and Microbiology; 2025. pp. 879–907. <https://doi.org/10.1016/b978-0-443-15956-5.00025-7>
9. Давыдова Е. А., Заболоцкая Т. А. Влияние молочного сырья на формирование пороков в сырах, вырабатываемых с применением пропионовокислых бактерий. Переработка и управление качеством сельскохозяйственной продукции. 2017. № 1. С. 45–47. [Davydova EA, Zabolotskaya TA. Effect of dairy raw materials on defects in cheese with propionic acid bacteria. Processing and quality Management of Agricultural Products. 2017;(1):45–47. (In Russ.)]
10. Myagkonosov DS, Smykov IT, Abramov DV, Delitskaya IN, Ovchinnikova EG. Influence of different milk-clotting enzymes on the process of producing semihard cheeses. Food systems. 2023;6(1):103–116. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2023-6-1-103-116>
11. Мордвинова В. А., Делицкая И. Н., Мягконосов Д. С., Ильина С. Г., Муничева Т. Э. Молокосвертывающие ферментные препараты и органолептические показатели сыров. Сыроделие и маслоделие. 2023. № 2. С. 15–18. [Mordvinova VA, Delitskaya IN, Myagkonosov DS, Ilyina SG, Municheva TE. Milk-clotting enzyme preparations and organoleptic characteristics of cheeses. Cheese- and Buttermaking. 2023;(2):15–18. (In Russ.)] <https://doi.org/10.31515/2073-4018-2023-2-15-18>
12. Thierry A, Deutsch S-M, Falentin H, Dalmasso M, Cousin FJ, et al. New insights into physiology and metabolism of *Propionibacterium freudenreichii*. International Journal of Food Microbiology. 2011;149(1):19–27. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2011.04.026>
13. Орлова Т. Н., Функ И. А., Отт Е. Ф., Дорофеев Р. В. Пропионовокислые бактерии и их значение. Сыроделие и маслоделие. 2020. № 1. С. 28–29. [Orlova TN, Funk IA, Ott EF, Dorofeev RV. Propionic acid bacteria and their significance. Cheese- and Buttermaking. 2020;(1):28–29. (In Russ.)] <https://doi.org/10.31515/2073-4018-2020-1-28-29>
14. Николаева Е. А. Созревание сыра «Швейцарский» в полимерной пленке. Сыроделие и маслоделие. 2007. № 3. С. 13–14. [Nikolaeva EA. Ripening of the “Swiss” cheese in the polymer film. Cheese- and Buttermaking. 2007;(3):13–14. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/IALDCP>
15. Смирнова Т. С. Газообразующая активность пропионовокислых бактерий. Сборник трудов международной научно-практической конференции молодых учёных и специалистов отделения сельскохозяйственных наук Российской академии наук, 2024. С. 229–234. [Smirnova TS. The gas-forming activity of propionic acid bacteria. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference of Young Scientists and Specialists, Department of Agricultural Sciences, Russian Academy of Sciences, 2024. pp. 229–234. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/AEBKIK>
16. Кучеренко И. В., Кураева Е. В., Дуганова А. Ю. Газообразующая активность цитратсбраживающих лактококков. Молочная промышленность. 2024. № 3. С. 30–35. [Kucherenko IV, Kuraeva EV, Duganova AYU. Gas-forming citrate-fermentation by lactococci. Dairy industry. 2024;(3):30–35. (In Russ.)] <https://doi.org/10.21603/1019-8946-2024-3-6>
17. Лепилкина О. В., Лепилкина О. Н., Логинова И. Н. Рисунок в сырах: причины образования и методы оценки. Пищевые системы. 2021. Т. 4. № 3. С. 180–189. [Lepilkina OV, Lepilkina ON, Loginova IV. Eyes in cheese: Reasons for formation and methods of assessment. Food systems. 2021;4(3):180–189. (In Russ.)] <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2021-4-3-180-189>
18. Горина Т. А. Проблема позднего вспучивания сыров и пути ее решения. Сыроделие и маслоделие. 2019. № 1. С. 27–29. [Gorina TA. The problem of late cheese blowing and the ways to solve it. Cheese- and Buttermaking. 2019;(1):27–29. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/VVHHUE>
19. Богданова Л. Л., Ковалева В. В., Белокобылова А. Д. Исследование возможности использования лизоцима микробного происхождения при изготовлении сыров. Актуальные вопросы переработки мясного и молочного сырья. 2022. № 17. С. 220–225. [Bahdanava LL, Kovaleva VV, Belokobylova AD. Study of the possibility of using lysozyme of microbial origin in the production of cheese. Analysis of the modern market for lysozyme drugs. Topical Issues of Processing of Meat and Milk Raw Materials. 2022;(17):220–225. (In Russ.)]
20. Сорокина Н. П., Бруцкая А. Л. Дополнительные культуры в сыроделии. Нужны всегда, иногда или никогда? Сыроделие и маслоделие. 2024. № 1. С. 40–46. [Sorokina NP, Brutsкая AL. Additional crops in cheese making. Are you always, sometimes or never needed? Cheese- and Buttermaking. 2024;(1):40–46. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/VSPFEK>
21. Свириденко Г. М., Сорокина Н. П. Использование защитных культур: теоретические аспекты. Молочная промышленность. 2018. № 7. С. 25–28. [Sviridenko GM, Sorokina NP. Application of the protective cultures. Theoretical aspects. Dairy industry. 2018;(7):25–28. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/UVDFGE>
22. Rezaei Z, Khanzadi S, Salari A. Biofilm formation and antagonistic activity of *Lactocaseibacillus rhamnosus* (PTCC1712) and *Lactiplantibacillus plantarum* (PTCC1745). AMB Express. 2021;(11):155. <https://doi.org/10.1186/s13568-021-01320-7>
23. Свириденко Г. М., Вахрушева Д. С., Мамыкин Д. С. Перспективы применения пропионовокислых бактерий в качестве дополнительных культур в технологии сыров пониженной жирности. Молочная промышленность. 2022. № 10. С. 36–39. [Sviridenko GM, Vakhrusheva DS, Mamykin DS. Prospects for the use of propionic acid bacteria as adjunct cultures in the technology of low-fat cheeses. Dairy industry. 2022;(10):36–39. (In Russ.)] <https://doi.org/10.31515/1019-8946-2022-10-36-39>

24. Свириденко Г. М., Мордвинова В. А., Вахрушева Д. С., Остроухова И. Л. Маститы: проблема безопасности, качества и сыропригодности молока сырого. Сыроделие и маслоделие. 2024. № 3. С. 58–63. [Sviridenko GM, Mordvinova VA, Vakhrusheva DS, Ostroukhova IL. Bovine mastitis: Safety and quality issues in cheese production. Cheese- and Buttermaking. 2024;(3):58–63. (In Russ.)] <https://doi.org/10.21603/2073-4018-2024-3-5>
25. Логинов В. А., Линкевич Е. Т., Майоров А. А. Сезонность в производстве молока. Сыроделие и маслоделие. 2018. № 5. С. 34–36. [Loginov VA, Linkevich ET, Mayorov AA. Milk production and seasons. Cheese- and Buttermaking. 2018;(5):34–36. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/YZJETR>
26. Новгородская Н. В. Факторы, определяющие сыропригодность молока. Актуальные вопросы переработки мясного и молочного сырья. 2017. № 12. С. 143–148. [Novgorodskaya NV. Factors determining milk applicability to cheese making. Topical Issues of Processing of Meat and Milk Raw Materials. 2017;(12):143–148. (In Russ.)]
27. Topnikova EV, Mordvinova VA, Sviridenko GM, Danilova EN. Study of fatty acid composition of milk for cheese production. Food systems. 2019;2(4):34–37. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2019-2-4-34-37>
28. Auer J, Reited M, Senck S, Reiter A, Kastner J, *et al.* Investigation of opening eye defects and effects of different ripening profiles on eye structure in semi-hard cheese using X-ray micro-computed tomography. Food Structure. 2021;28:100190. <https://doi.org/10.1016/j.foostr.2021.100190>
29. Bücher C, Burtscher J, Domig KJ. Propionic acid bacteria in the food industry: An update on essential traits and detection methods. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety. 2021;20(5):4299–4323. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12804>
30. Vélez MA, Bergamini C, Wolf IV, Peralta GH, Perotti MC. Cheese ripening: An overview of technological strategies towards process acceleration. Food Chemistry, Function and Analysis. 2023;73:103–135.

Дополнительная информация об авторах / Additional information about the authors

Рогов Григорий Новомирович / Grigory N. Rogov ORCID 0009-0001-4540-5314; eLIBRARY SPIN 6334-8338
Смирнова Татьяна Сергеевна / Tatiana S. Smirnova ORCID 0009-0001-2590-7093; eLIBRARY SPIN 7885-0017
Топникова Елена Васильевна / Elena V. Topnikova ORCID 0000-0003-0225-6870; eLIBRARY SPIN 8650-5907

<https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-1-2621>
<https://elibrary.ru/YIRXDF>

Оригинальная статья
<https://fptt.ru>

Пищевая и биологическая ценность вторичного сырья осетровых объектов товарной аквакультуры Астраханской области



О. С. Якубова*, А. А. Кушбанова, М. В. Захарова

Астраханский государственный технический университет, Астрахань, Россия

Поступила в редакцию: 02.09.2025

Принята после рецензирования: 05.11.2025

Принята к публикации: 13.01.2026

*e-mail: o.s.yakubova@mail.ru

© О. С. Якубова, А. А. Кушбанова, М. В. Захарова, 2026



Аннотация.

Осетровые объекты товарной аквакультуры становятся сырьевой базой для промышленного производства продуктов питания. Голова осетра – преобладающий по массе отход, рациональная переработка которого позволит полноценно использовать рыбные ресурсы. Цель исследования – изучить химический состав и биологическую ценность тканей головы осетра.

В качестве объектов исследования использовали мышечную ткань русского осетра (*Acipenser gueldenstaedtii*) аквакультурного происхождения, головы и продукты их переработки. Для определения химического состава применяли стандартные методы исследования. Биологическую ценность белка рассчитывали согласно методике Продовольственного комитета ФАО/ВОЗ.

Составлена топография срезов тела осетра в разных частях туловища. Установлено наличие светлой и темной мускулатуры, скопление жировой ткани в подкожной, прихрящевой, брюшной зонах и соединительной ткани в частях тела осетра. Исследование химического состава мяса головы, туловища, хвоста показало содержание воды от 76,0 до 82,9 %; белка – от 14,2 до 18,5 %; жира – от 2,4 до 4,9 %; минеральных веществ – от 0,1 до 0,6 %. Зафиксировано снижение содержания жира в мясе в среднем в 2,8 раза по сравнению с параметрами промыслового осетра. В продуктах переработки головы осетра (мясо и мягкие ткани) белка – 18,6 и 20,4 %; жира – 12,2 и 16,2 %. Данные схожи по составу, но отличаются по пищевой ценности. Биологическая ценность белков мяса головы осетра составила 44,1 %, что на 2,6 % выше этого показателя для мягких тканей. В жире головы осетра установлено содержание мононенасыщенных жирных кислот (45,8 %) и полиненасыщенных жирных кислот ω -3 (11,0 %) и ω -6 (15,2 %).

Продукты переработки головы осетра являются источниками ценного белка и жира, представляют перспективу для использования в многокомпонентных продуктах питания.

Ключевые слова. Рыба, аквакультура, осетр, русский осетр, голова осетра, мясо осетра

Финансирование. Работа выполнена на базе ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет» за счет средств гранта Российского научного фонда № 24-26-00082, <https://rscf.ru/project/24-26-00082/>

Для цитирования: Якубова О. С., Кушбанова А. А., Захарова М. В. Пищевая и биологическая ценность вторичного сырья осетровых объектов товарной аквакультуры Астраханской области. Техника и технология пищевых производств. 2026. Т. 56. № 1. С. 44–56. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-1-2621>

Nutritional Value of Sturgeon Recyclables in Astrakhan Region



Olesia S. Iakubova*, Adelia A. Kushbanova, Mariya V. Zaharova

Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russia

Received: 02.09.2025
Revised: 05.11.2025
Accepted: 13.01.2026

*e-mail: o.s.yakubova@mail.ru
© O.S. Iakubova, A.A. Kushbanova, M.V. Zaharova, 2026



Abstract.

Sturgeon waste is a raw material base for industrial food production. Sturgeon heads are responsible for the majority of waste, and their rational processing will allow for sustainable utilization of fish resources. This study focused on the chemical composition and biological value of sturgeon head tissues.

The research featured muscle tissue, heads, and processed products of Russian sturgeon (*Acipenser gueldenstaedtii*). While the chemical composition was studied by standard methods, the biological value of protein was calculated according to the FAO/WHO Food Committee methodology.

A topography of various body sections demonstrated the presence of light and dark muscles. Fat tissue accumulated in the subcutaneous, cartilaginous, and abdominal zones, while connective tissue was registered in different body parts. The chemical analysis of flesh from head, body, and tail revealed 76.0–82.9% water contents, 14.2–18.5% protein, 2.4–4.9% fat, and 0.1–0.6% minerals. The average fat content was 2.8 times lower than in commercial sturgeon. Soft tissues of sturgeon head contained 18.6–20.4% protein and 12.2–16.2% fat. These data are similar in composition but differ in nutritional value. The biological value of proteins in the flesh from sturgeon head was 44.1%, which was 2.6% higher than that of soft tissues. Sturgeon head fat contained 45.8% monounsaturated fatty acids, 11.0% ω -3 polyunsaturated fatty acids, and 15.2% ω -6 polyunsaturated fatty acids.

As reliable sources of valuable protein and fat, sturgeon head recyclables proved to be promising ingredients of multi-component foods.

Keywords. Fish, aquaculture, sturgeon, *Acipenser gueldenstaedtii*, sturgeon head, sturgeon flesh

Funding. The research was performed on the premises of the Astrakhan State Technical University as part of the contract with the Russian Science Foundation (No. 24-26-00082, <https://rscf.ru/en/project/24-26-00082/>)

For citation: Iakubova OS, Kushbanova AA, Zaharova MV. Nutritional Value of Sturgeon Recyclables in Astrakhan Region. Food Processing: Techniques and Technology. 2026;56(1):44–56. (In Russ.) <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-1-2621>

Введение

Промысел осетровых рыб в Волжско-Каспийском рыбохозяйственном бассейне ведется с XIV в. Традиционно мясо этих ценных рыб перерабатывали в деликатесную продукцию (балыки провесные горячего и холодного копчения), а также в кулинарные изделия, консервы и др. Мясо осетровых рыб считается универсальным: его можно перерабатывать разными способами. Основные данные о химическом составе промысловых осетровых рыб в зависимости от видового разнообразия (осетр, белуга, стерлядь, севрюга), района обитания, части рыбы и других факторов представлены в справочнике Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии [1]. Традиционные технологии переработки осетровых рыб представлены в Сборнике технологических инструкций по обработке рыбы. В настоящее время естественные запасы

осетровых рыб уменьшились настолько, что популяция этих видов поддерживается путем искусственного воспроизводства. Для сохранения осетровых видов рыб в 2000 г. Российская Федерация ввела запрет на промысел белуги в Волжско-Каспийском рыбохозяйственном бассейне, а в 2005 г. – также на добычу осетра и севрюги. В 2013 г. все прикаспийские государства договорились о введении полного моратория на коммерческий лов осетровых в Каспийском море, страны консолидированно проводят научные исследования по изучению состояния водных биоресурсов, выпуски молоди осетровых видов рыб от искусственного воспроизводства и рыбоохранные мероприятия [2–4]. В связи с этим продукция из мяса промысловых осетровых рыб отсутствует на потребительском рынке, введен запрет на ее реализацию.

Развитие аквакультуры способствует увеличению количества товарных осетровых рыб. По данным

Министерства сельского хозяйства и рыбной промышленности Астраханской области и Волго-Каспийского территориального управления Федерального агентства по рыболовству, с 2021 по 2024 гг. производство (выращивание) осетровых объектов товарной аквакультуры в Астраханской области составило: в 2021 г. – 1,8 тыс. т; в 2022 г. – 1,9 тыс. т; в 2023 г. – 2,4 тыс. т; в 2024 г. – 2,7 тыс. т. Среди осетровых рыб в наибольшем количестве выращивается русский осетр, его объемы в 2024 г. составили 1,6 тыс. т, по сравнению с 2021 г. отмечается рост на 92 % [5]. Таким образом, в Астраханской области существует сырьевая база товарных осетровых рыб аквакультурного происхождения как для проведения научных разработок, так и для промышленной переработки на предприятиях пищевой промышленности и индустрии питания. Однако среда обитания, условия выращивания, кормовая база в дикой среде обитания и аквакультуре отличаются, это обуславливает изменение состава и свойств осетровых рыб искусственного воспроизводства как сырьевого ресурса для переработки.

В последнее время проводятся научные и практические исследования осетровых рыб аквакультурного происхождения как относительно нового сырьевого ресурса. Так как это особо ценное сырье, в первую очередь исследуют мышечную ткань осетровых рыб, чтобы вырабатывать деликатесную продукцию высокого качества. Учеными установлены размерно-массовые характеристики, химический состав и пищевая ценность мышечной ткани осетровых рыб разных генотипов и гибридов аквакультурного происхождения [6–9]. Предложены современные направления переработки мышечной ткани гибридов осетровых рыб [10–12]. Помимо мяса, при разделке рыбы образуются отходы: голова, кожа, хрящи, плавники, чешуя (жучки), кости, внутренности и др. Эти части рыбы могут выступать вторичным сырьем. Учитывая высокую ценность осетровых рыб, вовлечение отходов в производственный процесс рационально, перспективно и экономически целесообразно. В настоящее время имеются сведения о переработке гонад товарного осетра в технологии рыбных консервов [13]. Разработана технология извлечения и использования коллагена из плавательных пузырей товарных осетровых [6]. Рассмотрены технологические свойства кожи русского осетра как перспективного кожевенного сырья [14]. Определен биопотенциал переработки жучек осетра (ганоидной чешуи) [15]. Исследованы головы гибридов осетровых рыб как сырьевой ресурс для получения желатина [16]. Изучена возможность обогащения сурими жиром из голов осетра [17].

Особенности переработки головы осетра обусловлены строением: она представлена целым каркасом, состоящим из хрящей, костей, мяса и мягких тканей, трудно делимых по частям без термической

обработки. Голова русского осетра содержит прирезь мышечной ткани, доля съедобных частей отварных голов составляет 51,91 %, доля хряща – 24,41 % [5]. Переработка такого сырья требует определенного технологического подхода. Имеется научный опыт по извлечению гидролизатов белка из голов нерки, установлена перспективность применения продуктов переработки голов тихоокеанского лосося в пищевых целях [18]. Учитывая, что голова осетра – наиболее весомый отход при разделке рыбы, содержащий большое количество ценных компонентов, ее переработка представляет научно-практический интерес. Также следует отметить перспективность использования хряща головы осетра для получения продуктов переработки коллагена различного назначения. Сейчас наиболее актуальным направлением является получение из коллагенсодержащего сырья животного происхождения биоактивных пептидов коллагена [19–27]. Осетровые виды рыб являются ценным сырьем как по потребительским свойствам, так и по стоимости, пищевая ценность и вкусоароматические показатели обуславливают высокую цену готовой продукции. Этот фактор приводит к определенным ограничениям в доступности указанной продукции для массового потребления. Исследование потребительских предпочтений демонстрирует, что первостепенное значение при принятии решения о покупке пищевой продукции отдается качеству, информации о соответствии продукции принципам здорового питания и стоимости [28–30]. Использование вторичных ресурсов осетровых для получения пищевых продуктов позволит снизить сырьевую нагрузку в себестоимости и повысить доступность готовой продукции из осетровых для потребителей. Имеющиеся данные по теме работы указывают на всесторонность исследования вторичных ресурсов осетровых рыб аквакультурного происхождения, но представленная информация не содержит полных сведений о химическом составе продуктов переработки голов русского осетра (мясо и мягкие ткани), выращенного в условиях аквакультуры предприятиями Астраханской области.

Для разработки и моделирования продукции на основе съедобных тканей отварной головы осетра необходимо провести углубленное исследование химического состава частей этого вторичного сырья. Цель исследования – сравнить химический состав мышечной ткани головы русского осетра; изучить топографию поперечных срезов тела русского осетра; исследовать химический состав мяса и мягких тканей отварной головы осетра; определить аминокислотный состав и биологическую ценность продуктов переработки головы осетра; установить жирнокислотный состав.

Объекты и методы исследования

В качестве объектов исследования использовали русского осетра (*Acipenser gueldenstaedtii*) аквакультурного происхождения, выращенного предприятиями

рыбохозяйственного комплекса Астраханской области (ООО «Астраханская рыболовная компания Белуга» и ООО ТД «А-ИКРА»), головы и продукты их переработки. Отбор проб проводили в соответствии с требованиями ГОСТ 7636-85, ГОСТ 31339-2006, ГОСТ 7631-2008, ГОСТ 32366-2013. Сырье, материалы и реактивы соответствовали регламентированным требованиям. Научно-исследовательская работа проводилась в лаборатории «Техника и технологии биополимеров» Астраханского государственного технического университета (Астрахань, Россия) в период 2023–2025 гг. Для определения химического состава использовали мороженую продукцию русского осетра возраста 2,5–3,0 лет в количестве 10 тушек весом от 3,06 до 3,63 кг и 10 голов весом от 2,08 до 1,35 кг, изготовленную в ноябре 2023 г., средний суммарный вес головы и тушки – 6,0 кг. Химический состав (влага, белок, жир и зола) определяли с учетом ГОСТ 7636-85. Массовая доля белка определялась по методу Кьельдаля, методики модифицированы и адаптированы для аппаратов «Turbotherm» и «Vapodest-30» (Gerhardt, Германия). Массовую долю жира определяли экстракционным методом на полуавтоматическом аппарате экстракции по Сокслету АСВ-6. Для установления содержания золы использовали метод сжигания, для влаги – метод высушивания при $t = 100\text{--}105\text{ }^{\circ}\text{C}$. Аминокислотный состав определяли по ГОСТ 34132-2017 с использованием хроматографического метода на базе научно-исследовательского испытательного центра Федерального научного центра пищевых систем имени В. М. Горбатова РАН (Москва, Россия). Данные массового содержания компонентов указаны с учетом средней статистической погрешности. В качестве аналитов определяли аминокислоты, включающие в себя связанные и свободные формы. Качественный и количественный состав смеси жирных кислот головы русского осетра выявляли методом газовой хроматографии с учетом требований ГОСТ 31663-2012 с использованием хроматографа Хроматэк-Кристалл 5000 с пламенно-ионизационным детектором (Хроматэк, Россия). Идентификационная смесь для хроматографии являлась многокомпонентной и состояла из 37 компонентов метиловых эфиров жирных кислот массовой концентрации 10 мг/мл (Supelco 37 Component Fame Mix, Sigma-Aldrich, Германия). Для хроматографирования метиловых эфиров жирных кислот идентификационной стандартной смеси и анализируемых проб жира головы русского осетра использовали идентичные режимы эксплуатации хроматографа. Статистическая обработка результатов исследования проведена по показателю точности с учетом вычета известной концентрации стандартной смеси.

Биологическую ценность оценивали относительно «идеального» белка, рассчитывая аминокислотный скор (АКскор, %) согласно методике Продовольственного комитета Всемирной организации здравоохранения ФАО/ВОЗ; аминокислотную сбалансированность –

по методике Н. Н. Липатова (1996). Для оценки биологической ценности использовали основополагающие показатели и критерии, предложенные академиками РАСХН Н. Н. Липатовым, И. А. Роговым.

Высокая точность измерений в рамках исследования определялась не менее чем тремя повторениями экспериментов для каждого образца и / или пробы с последующей математической обработкой и установлением среднего арифметического значения при допуске относительном расхождении величин 5 %. Использование общепринятых алгоритмов и методов математической статистики, графических программ и приложений обеспечивает статистическую значимость результатов.

Результаты и их обсуждение

Исследование химического состава мяса осетра проводили по частям с учетом анатомических особенностей строения тела рыбы, т. к. они обуславливают пищевую ценность и стоимостные показатели продукции.

Тело рыбы укрупненно состоит из трех плавно переходящих одна в другую частей: голова, туловище и хвост. К голове относят часть тела от вершины рыла до конца жаберных крышек. Туловищем считают часть тела между концом жаберных крышек и анальным отверстием. Хвост расположен после анального отверстия и включает хвостовой стебель и хвостовой плавник. Под кожей, покрывающей тело рыбы, находятся мышцы, опирающиеся на хрящевой скелет. Туловищная мускулатура включает четыре продольные мышцы – по две спинных и брюшных, разделенных перегородкой соединительной ткани. Мышцы состоят из поперечно-полосатой мышечной ткани, которая является основной и ценной съедобной составляющей тела рыбы. Скопление мышц представляет волокна, соединенные в пучки и покрытые соединительной тканью, которые тесно соприкасаются с жировой тканью.

Рисунок 1 содержит визуальную топографию срезов тела осетра в разных частях, на которой схематично представлены неправильные концентрические окружности соединительнотканых перегородок на сегментах светлых и темных мышц, скелетный хрящ и скопление жира. Светлая мускулатура преобладает в мышечной ткани осетра, а темная составляет не более 10 % от количества всех мышц. У осетра темные мышцы располагаются непосредственно под кожей вдоль боковой линии. На срезе головы у жаберных крышек наблюдается меньшее количество темной мускулатуры, чем на других срезах. При разрезе туловища осетра отмечено наличие значительного количества светлой мускулатуры, а темная мускулатура присутствует по бокам. Отмечается коричневый оттенок и большее количество темных мышц и соединительной ткани в хвостовой части, что связано с повышенной двигательной активностью этой части тела рыбы и обуславливает более плотную консистенцию

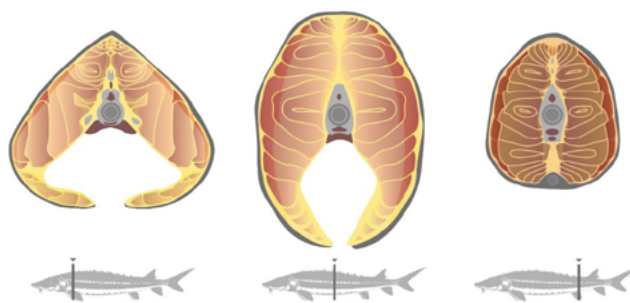


Рисунок 1. Топография тела русского осетра (*Acipenser gueldenstaedtii*) при поперечных разрезах

Figure 1. Topography of Russian sturgeon (*Acipenser gueldenstaedtii*) in cross sections

мышечной ткани. Именно с учетом разделения рыбы по этим частям на предприятиях происходит разделка и производство мороженой рыбной продукции. В настоящее время предприятия Астраханской области производят следующие мороженные части тела осетра: голова, тушка (туловище и хвост вместе), кусок и стейк (туловище), хвост. В основном все части рыбы реализуются с кожей, т. к. ее отделение приводит к уменьшению выхода готовой продукции и частичному удалению темных мышц и жира ввиду того, что они аккумулированы под кожей и плотно к ней прилегают. Также из частей головы и хвоста комплектуется суповой набор. Стоимость разных частей тела осетра существенно отличается: наиболее высокую цену имеет продукция из туловища, причем чем меньше в ней хрящей и кожи, тем выше стоимость; далее по убыванию – хвост и голова [3]. Помимо различий по соотношению светлой и темной мускулатуры в частях тела рыбы, на срезах отмечается скопление разного количества жировой ткани в подкожной, прихрящевой, брюшной зонах. Прихрящевой и подкожный жир присутствуют во всех частях тела рыбы, в меньшей степени – в хвосте. В мясе головы и туловища присутствует в большем количестве брюшной жир, что обуславливает возможность его отделения в виде тешы. Это брюшная часть рыбы отделена от нее срезом от приголовка до анального плавника, как правило, теша отделяется у крупных рыб. Отмечается наличие хрящевой (плотной соединительной) ткани, она выполняет роль основной опорной ткани у осетровых. Твердая соединительная ткань (кости) отсутствует в скелете, но обнаружена в голове осетра.

На рисунке 1 видно наличие мышц, которые остаются в качестве прирези у головы осетра и переходят в отходы. Уменьшить потери мяса при отделении головы можно использованием наклонного (косого) реза под углом около 60 °С или применением фигурного реза. Однако на практике эти способы редко применяются. На производстве, как правило, голова отделяется прямым резом, ее комплектуют с хвостом и реализуют в качестве супового набора. Головы и наборы для супа представлены в ассортименте пред-

приятий по самой низкой стоимости из всего ассортимента мороженой продукции из осетровых рыб, на них зачастую производитель устанавливает скидки, что указывает на сложности их реализации. Рациональным использованием голов осетра как вторичного сырья предприятия может стать глубокая переработка с выпуском востребованной пищевой продукции, максимально готовой к употреблению. Для этого необходимо определить технологические подходы к переработке, химический состав и пищевую ценность тканей головы.

Результаты сравнительного исследования химического состава мышечной ткани тела русского осетра (голова, туловище и хвостовая часть) отражены в таблице 1. Также для сравнения представлены литературные данные о химическом составе мяса промыслового русского осетра. Мышечная ткань рыбы представляет собой сложную коллоидную систему, состоящую из воды, белков, жиров и минеральных веществ.

Содержание белка в мышечной ткани осетра аквакультурного происхождения составляет от 14,2 до 18,5 %, расхождение по содержанию в зависимости от расположения мяса в теле рыбы составляет до 23 %. Самое высокое содержание белка установлено в хвостовой части тушки, наименьшее – в туловище. Содержание жира в частях осетра варьируется от 2,4 до 4,9 %, наибольшее количество отмечается в мясе головы, наименьшее – в туловище. Снижение содержания жира в мясе туловища осетра, возможно, обусловлено предварительной разделкой на филе: в результате от мышечной ткани отделяются кожа и хрящи с прилегающим жиром, таким образом, количество жира в средней пробе мяса, направленной на исследование, уменьшается. Разделка головы с отделением мяса от кожи и хрящей в свежем виде (без термической обработки) не представляется возможной. Прирези мяса головы находятся рядом с прилегающим к хрящам жиром, это наглядно видно на топографии срезов тела русского осетра (рис. 1). В связи с этим при отделении мяса головы в него поступает большее количество жира, чем в мясо туловища. В мясе хвоста ситуация аналогичная. Снижение жира в мясе туловища, по сравнению с мясом

Таблица 1. Сравнительная характеристика химического состава мышечной ткани русского осетра аквакультурного и промыслового происхождения

Table 1. Chemical profile of muscle tissue of Russian sturgeon: Aquaculture vs. commercial fish

Расположение мяса по частям	Содержание основных пищевых веществ, %			
	Вода	Белки	Жиры	Минеральные вещества (зола)
Русский осетр аквакультурного происхождения				
Голова	78,14 ± 2,48	16,63 ± 0,82	4,92 ± 0,16	0,42 ± 0,01
Туловище	82,91 ± 1,23	14,24 ± 0,69	2,43 ± 0,11	0,55 ± 0,01
Хвост	76,03 ± 1,45	18,54 ± 0,87	4,68 ± 0,14	0,08 ± 0,01
Русский осетр промысловый [1]				
Голова	70,0	18,0	10,9	1,1
Туловище	70,0	19,5	9,3	1,2
Хвост	69,7	18,1	11,1	1,1

головы и хвоста, отмечается и у промыслового осетра. Существует обратная зависимость между содержанием жира и воды в мясе рыбы. Содержание минеральных веществ в мясе осетра не превышает 0,6 %. Сравнение полученных данных химического состава мяса русского осетра аквакультурного происхождения с соответствующими показателями рыбы промыслового вылова [1] показало значительное снижение содержания жира в мясе осетра аквакультурного происхождения: у головы – в 2,2 раза; у туловища – в 3,8 раза; у хвостовой части – в 2,4 раза. Содержание белка в мясе аквакультурного осетра, по сравнению с данными для промысловой рыбы, в области головы снижено на 7,6 %, в области туловища – на 27 %, а в хвосте превышает показатели промысловой рыбы на 2,4 %.

Известные данные химического состава мышечной ткани русского осетра, выращенного в рыболовных хозяйствах Астраханской области и Краснодарского края (осеннего спуска прудов) [6], показывают содержание воды – 77,4 %; белка – 13,3 %; жира – 8,8 %; минеральных веществ – 0,7 %. Химический состав мышечной ткани русского осетра, выращенного на предприятии ООО «Рыботоварная фирма Диана»: влага – 73,9 %; белок – 15,7 %; жир – 8,8 %; зола – 1,2 % [10]. Полученные данные по содержанию белка в мышечной ткани русского осетра аквакультурного происхождения отличаются от известных не более чем на 24 %, а по содержанию жира отмечено снижение среднего значения в 2,2 раза. Это может быть обусловлено различной кормовой базой, условиями содержания и другими факторами, а также особенностями отбора проб для исследований химического состава мяса, т. к. в представленных литературных данных по химическому составу русского осетра товарной аквакультуры не проводится разделение мяса по расположению в частях рыбы (голова, туловище, хвост).

В рамках настоящего исследования химического состава учтено расположение мяса в теле русского осетра; использована предварительная разделка туловища

рыбы на филе; проведено отделение мяса от несъедобных частей способом, максимально приближенным к производственным условиям, то есть не включен прихрящевой и подкожный жир. Такой подход позволяет ускорить переход научно-исследовательских данных в производственную сферу и, как следствие, повысить информированность потребителя о рыбной продукции.

По содержанию белка в мясе рыба делится на четыре группы: низкобелковая – до 10 %; среднебелковая – от 10 до 15 %; белковая – от 15 до 20 %; высокобелковая – более 20 %. Русский осетр аквакультурного происхождения по среднему значению содержания белка относится к группе белковых, так же как и промысловый. Классификация рыб по степени жирности мышечной ткани предусматривает три группы: тощими называются рыбы, если содержание жира составляет менее 4 %; средней жирности – от 4 до 8 %; жирные – более 8 %. Русский осетр аквакультурного происхождения по среднему значению содержания жира относится к среднежирным, а промысловый – к жирным.

Содержание жира в мясе рыб – важный технологический показатель, определяющий направление использования сырья. Традиционные технологии рекомендуют использовать жирное и особо жирное рыбное сырье для производства балычных изделий, а среднежирное – направлять на производство кулинарных изделий и консервов. Полученные эмпирические значения относятся к осетрам весом около 6 кг, содержание жира может зависеть также от размерно-массовых характеристик: чем крупнее осетр, тем выше содержание жира в мясе.

Исследование химического состава мяса (прирези) головы осетра показало, что это сырье не уступает мышечной ткани туловища. Следовательно, головы осетра представляют перспективу в качестве вторичного сырья для переработки на пищевые цели. Особенность переработки голов рыб заключается в сложности разделения съедобных и несъедобных частей. Поэтому предварительно замороженные головы

дефростировали на воздухе при температуре 2–6 °С, отделяли жабры, затем варили в воде при гидромодуле 2:1 в течение 1,0–1,5 ч, остужали. После варки головы поддаются разделению по частям. Этот процесс проводится с использованием ручного труда, после разделения продукты становятся доступной средой для микроорганизмов, поэтому на этом этапе важно проводить санитарно-микробиологический контроль и соблюдать установленные нормы, предусмотренные для производства пищевой продукции из рыбы в таких условиях. После обработки выделили 4 группы продуктов переработки отварных голов осетра: мясо, мягкие ткани, хрящи, кости. Особый интерес для пищевых целей представляли мясо и мягкие ткани головы осетра. Они могут стать сырьем для приготовления пищевой пастообразной рыбной продукции. Результаты исследования химического состава продуктов переработки головы осетра представлены в таблице 2.

Содержание белка в мясе и мягких тканях головы осетра составляет 20,4 и 18,6 %; жира – 16,2 и 12,2 % соответственно. Отмечается высокое содержание жира в отварных частях головы по сравнению с сырым мясом головы осетра, это обуславливается тем, что после варки мясо легко отделяется от хрящей вместе с прихрящевым и подкожным жиром. Несмотря на достаточно схожие данные химического состава, мясо и мягкие ткани отличаются по структуре. Мясо – это непосредственно мышечные волокна от прирези мяса у головы, а мягкие ткани – это масса, формирующаяся при отделении хрящей и костей от тканей головы, они содержат темную мышечную ткань, большое количество кожи и соединительной ткани, содержащих белки коллагена и эластина, которые относятся к неполноценным белкам.

При разделке головы осетра также отделяются хрящи и кости, которые составили 24 %, кости – 11 % к массе отварной головы. Несмотря на то что основным структурным белком хряща и костей является коллаген, по структуре эти части существенно отличаются. Хрящ достаточно мягкий и поддается измельчению, кости – тонкие и жесткие. Предварительное исследование химического состава хрящей отварной головы русского осетра показало содержание воды – 73 %;

белка – 20 %; жира – 5 %; золы – 2 %. Хрящ головы может представлять перспективу переработки для пищевых целей после обработки. Это исследование будет освещено в дальнейших работах. Кости головы осетра могут использоваться после специальной обработки для получения кормовых продуктов.

Для установления пищевой и биологической ценности и, как следствие, перспектив переработки мясного вторичного сырья проводили исследование аминокислотного состава мяса и мягких тканей головы осетра.

Фактические значения показателей аминокислотного состава для двух объектов продуктов переработки головы осетра (мясо и мягкие ткани головы осетра) представлены на рисунке 2.

Белковые фракции вторичного сырья головы осетра являются источником многих ценных аминокислот, играющих важную роль для организма человека в рамках ферментативных и регуляторных процессов. Согласно нормированию физиологических потребностей в энергии и незаменимых пищевых веществ, дефицит в питании эссенциальных пищевых веществ приводит к развитию патологических состояний. Полноценными в биологическом отношении протеины считаются в том случае, когда они по своему химическому составу наиболее близки к белкам, из которых состоит потребляющий их организм.

В образцах мяса и мягких тканей головы осетра идентифицировано 18 аминокислот, среди которых доля незаменимых аминокислот составила 42,4 и 38,2 %; заменимых аминокислот – 57,6 и 61,8 % для мяса и мягких тканей головы осетра соответственно.

Доминирующий по массе набор аминокислот для мяса головы осетра: глутаминовая кислота – 14,9 %; аспарагиновая кислота – 10,1 %; лизин – 9,4 %; лейцин – 8,5 %; аланин – 8,0 %; аргинин – 6,7 %. Мягкие ткани головы осетра отличаются преобладающим набором следующих аминокислот: глицин – 13,6 %; глутаминовая кислота – 12,2 %; аспарагиновая кислота – 8,7 %; треонин – 8,5 %; аланин – 8,3 %; аргинин – 7,6 %. В мягких тканях обращало на себя внимание содержание глицина, в 2,4 раза превышающее значение по сравнению с мясом головы осетра, что подтверждает данные о коллагеновой природе белков мягких тканей головы осетра.

Образцы мяса и мягких тканей головы осетра отличались высоким содержанием аспарагиновой и глутаминовой кислот, являющихся известными химическими предшественниками образования вкусовых веществ и способных к интеграции азотистого обмена. В мясе головы осетра содержание аспарагиновой и глутаминовой кислот превышало на 16,3 и 21,9 % данный показатель для мягких тканей.

Анализ показал повышенное содержание незаменимых аминокислот в образце мяса головы осетра по сравнению с мягкими тканями (гистидин и метионин – в среднем на 32,0 %; валин и фенилаланин – в среднем на 11,7 %; изолейцин – на 21,8 %; лейцин –

Таблица 2. Химический состав мяса и мягких тканей отварной головы осетра

Table 2. Chemical profile of boiled sturgeon head: Flesh and soft tissues

Содержание основных пищевых веществ, %			
Вода	Белки	Жир	Минеральные вещества (зола)
Мясо			
62,77 ± 0,82	20,40 ± 0,29	16,15 ± 0,15	0,14 ± 0,01
Мягкие ткани			
68,56 ± 0,78	18,60 ± 0,85	12,16 ± 0,33	0,64 ± 0,03

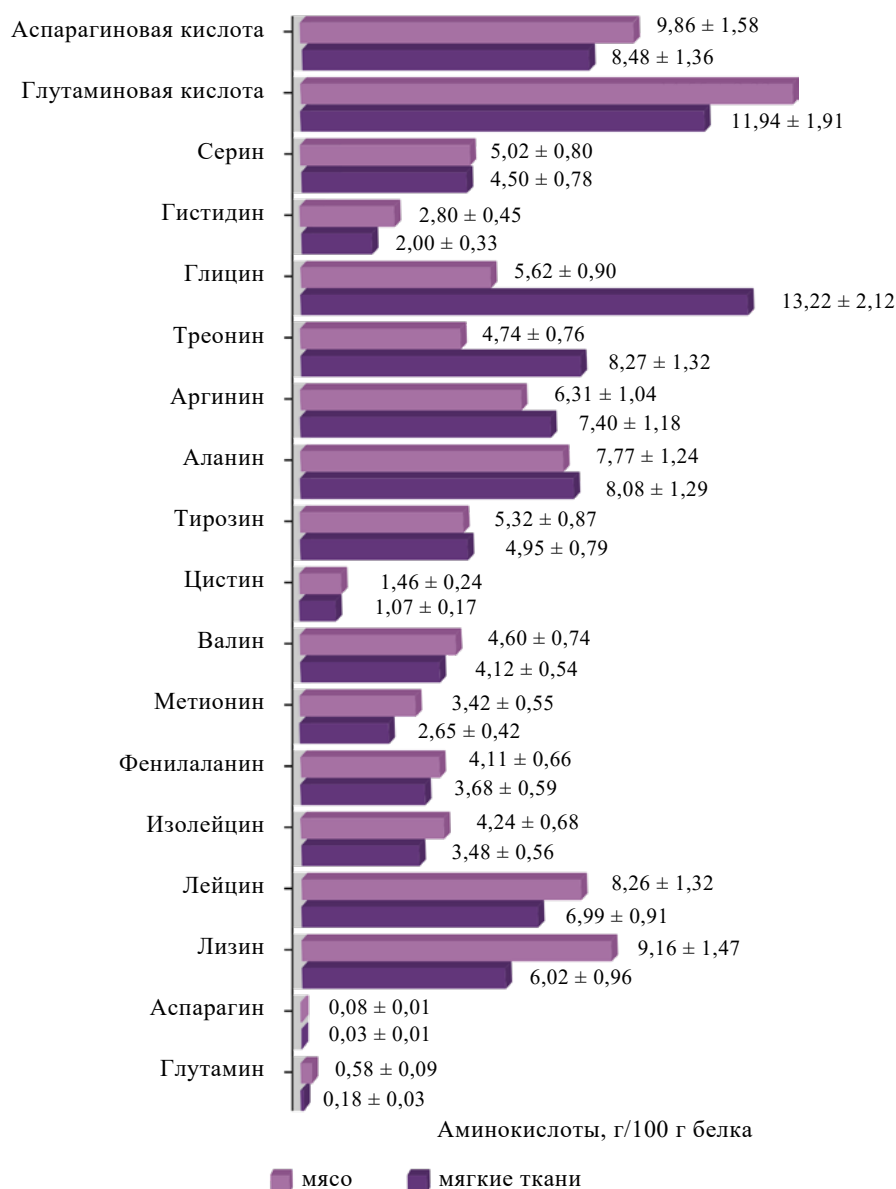


Рисунок 2. Аминокислотный состав средней лабораторной пробы мяса и мягких тканей головы русского осетра

Figure 2. Amino acid profile of sturgeon head: Flesh and soft tissues mean values

на 18,2 %; лизин – на 52,2 %), за исключением аминокислоты, треонин – единственное вещество мягких тканей, превышающее значение показателей мяса в 1,7 раза. Для таких заменимых аминокислот, как серин, аланин, тирозин, содержание в образцах мяса и мягких тканей головы осетра находилось на одном уровне, отклонение не превышало 10 %.

Биологическая ценность белковой составляющей вторичных ресурсов головы русского осетра является важнейшей составляющей пищевой адекватности белковых компонентов сырья и готовой продукции. Результаты оценки пищевой адекватности белковых компонентов средней пробы мяса и мягких тканей головы осетра представлены в таблице 3.

Мясо и мягкие ткани головы осетра отличались отсутствием лимитирующих незаменимых аминокислот, аминокислотный скор которых не превышает 100 %, что может свидетельствовать об аминокислотной сбалансированности белка. Как для мяса, так и для мягких тканей головы осетра минимальный из скоров незаменимых аминокислот отмечался для валина (115 % – мясо и 103 % – мягкие ткани), что идентично для образца мышечной ткани русского осетра, согласно данным А. В. Артемова и др. [10]. Для мяса головы осетра основная масса незаменимых аминокислот, находящихся в избытке, приходилась на сочетания фенилаланин + тирозин (217,8 %), метионин + цистин (202,2 %); для мягких тканей – на треонин (330,8 %),

Таблица 3. Показатели биологической ценности мяса и мягких тканей головы осетра

Table 3. Biological value indicators of sturgeon head: Flesh and soft tissues

Незаменимая аминокислота (НАК)	Содержание аминокислоты в эталонном белке (шкала ФАО/ВОЗ, 2013 г.), г/100 г белка	Содержание АК, г/100 г белка		Аминокислотный скор (АКскор), %		Коэффициент утилитарности i незаменимой аминокислоты (K_i)	
		мясо	мягкие ткани	мясо	мягкие ткани	мясо	мягкие ткани
Лейцин	6,10	8,26	6,99	135,41	114,59	0,85	0,90
Лизин	4,80	9,16	6,02	190,83	125,42	0,60	0,82
Изолейцин	3,00	4,24	3,48	141,33	116,00	0,81	0,89
Метионин + цистин	2,30	4,65	3,70	202,17	160,87	0,57	0,64
Фенилаланин + тирозин	4,10	8,93	8,63	217,80	210,49	0,53	0,49
Треонин	2,50	4,74	8,27	189,60	330,80	0,61	0,31
Валин	4,00	4,60	4,12	115,00	103,00	1,00	1,00
Гистидин	1,60	2,80	2,09	175,00	130,63	0,66	0,79
Суммарное содержание НАК	28,40	47,38	43,30	—	—	—	—

фенилаланин + тирозин (210,5 %). Избыток указанных аминокислот может использоваться как источник неспецифического азота или для удовлетворения физиологической потребности организма в белке. Данные аминокислотного сора определяют максимальный уровень использования азота белка мяса и мягких тканей головы осетра для структурных функций, биосинтеза и пластического обмена.

Как для мяса, так и для мягких тканей головы осетра суммарное содержание незаменимых аминокислот в 100 г белка превышало значение для эталонного белка на 67 и 53 % соответственно. Средняя величина избытка аминокислотного сора незаменимых аминокислот по сравнению с наименьшим уровнем сора валина (показатель КРАС, %) для мяса головы осетра определена на уровне 55,9 %; для мягких тканей – на уровне 58,5 %. Биологическая ценность мяса головы осетра (44,1 %) превышала значение показателя для мягких тканей (41,5 %). Сравнительный анализ соотношения аминокислот с эталонными значениями ФАО/ВОЗ путем определения обобщенного коэффициента утилитарности аминокислотного состава (U , доли ед.) может свидетельствовать о способности утилизации в организме человека аминокислот в среднем для мяса и мягких тканей головы осетра на 69 %, отклонение от эталонных значений – на 31 %.

Оценка биологической ценности белков съедобных частей головы русского осетра на основе значений аминокислотного сора показала, что мясо и мягкие ткани имели высокие значения. Результаты аминокислотного состава свидетельствуют о возможности использования мяса и мягких тканей головы осетра в производстве пищевой продукции при соблюдении принципов сбалансированности и комбинирования рецептурных компонентов.

Исследование химического состава продуктов переработки отварной головы осетра выявило высокое

содержание жира (табл. 1). Для определения биологической ценности этого жира провели газохроматографические исследования жирнокислотного состава липидов головы русского осетра (табл. 4).

Результаты исследований жира головы русского осетра показали суммарное содержание мононенасыщенных жирных кислот группы ω -9 на уровне 45,8 %; полиненасыщенных жирных кислот ω -3 и ω -6 – 26,2 %. Состав и количественное содержание полиненасыщенных жирных кислот: суммарная массовая доля полиненасыщенных жирных кислот биологически активного ряда ω -3 – 11,0 %; ω -6 – 15,2 %. Согласно МР 2.3.1.0253-21, оптимальное соотношение в суточном рационе жирных кислот ряда ω -6: ω -3 должно составлять 5–10:1, такое соотношение достигается балансированием и комбинированием рецептурных компонентов готовой продукции.

Благодаря химической структуре ряд жирных кислот ω -3, ω -6, ω -9 имеет широкий спектр биологического действия, заключающийся в регулировании обмена веществ, построении клеточных мембран, образовании биологически активных соединений для выполнения энергетической, антиоксидантной и защитной функций в организме человека. Состав жиров головы русского осетра включает физиологически необходимые и эссенциальные кислоты, такие как линолевая (14,2 %), линоленовая (3,4 %) и арахидоновая (0,03 %), составляющие витамин F.

Таким образом, съедобные части головы осетра (мясо и мягкие ткани) представляют перспективу для переработки в пищевую продукцию на предприятиях пищевой промышленности и в индустрии питания. В целях развития внутреннего рынка рыбопродукции РФ перспективным направлением переработки рыбного сырья является производство высокодоходной продукции нового ассортимента повышенного качества и с использованием современных видов упаковки [31]. Изго-

Таблица 4. Жирнокислотный состав липидов головы русского осетра

Table 4. Fatty acid profile of fat of sturgeon head

Наименование кислоты	Липидная формула	Концентрация, %
Насыщенные (НЖК)		
Пентадекановая	C15:0	0,35 ± 0
Пальмитиновая	C16:0	20,69 ± 0,13
Масляная	C4:0	0,01 ± 0
Лауриновая	C12:0	0,03 ± 0,01
Миристиновая	C14:0	2,67 ± 0,19
Маргариновая	C17:0	0,33 ± 0
Стариновая	C18:0	1,42 ± 0,14
Арахидовая	C20:0	1,18 ± 0
Генейкозановая	C21:0	1,29 ± 0,12
Суммарная концентрация (Σ)		27,97
Мононенасыщенные (МНЖК)		
Миристолеиновая	(C14:1 n5-c9)	0,12 ± 0,01
Пальмитолеиновая	(C16:1 n7-c9) ω-9	5,39 ± 0,02
Маргаринолеиновая	(C17:1 n8-c9)	0,26 ± 0,01
Олеиновая	цис-9, (C18:1 n9c) ω-9	39,23 ± 0,15
Нервоновая (селахоловая)	(C24:1) ω-9	0,85 ± 0,01
Суммарная концентрация (Σ)		45,85
Полиненасыщенные (ПНЖК)		
Линолевая	(C18:2 n6c) ω-6	14,20 ± 0,65
Гамма(γ)-линоленовая	(C18:3 n6-c6, c9, c12) ω-6	0,91 ± 0,05
Альфа(α)-линоленовая	(C18:3 n3-c9, c12, c15) ω-3	2,45 ± 0,09
Эйкозодиеновая	(C20:2 c-11,14) ω-6	0,03 ± 0
Эйкозатриеновая	(C20:3 n6c-8,11,14) ω-6	0,01 ± 0,01
Арахидоновая	(C20:4 n6c-5, c8, c11, c14) ω-6	0,03 ± 0,06
Эйкозапентаеновая (тимнодоновая)	(C20:5 n3c-5,8,11,14,17) ω-3	1,23 ± 0,08
Докозагексаеновая (цервоновая)	(C22:6 n3c-4,7,10,13,16,19) ω-3	7,10 ± 0,51
Эйкозатриеновая	(C20:3 n3c-11 ,14 ,17) ω-3	0,23 ± 0,09
Суммарная концентрация (Σ)		26,19

товление паст и риегов из исследованных вторичных рыбных ресурсов русского осетра соответствует актуальным направлениям производства. Пасты или паштеты из рыбы имеют вид однородной тонкоизмельченной массы. Риегом называется продукт, похожий на паштет, но при этом отличающийся более крупным фрагментированием основного продукта и более грубой, волокнистой консистенцией. Рыбные пасты и риеги – готовые к употреблению продукты. Потребители используют их на завтрак, для бутербродов и сэндвичей, а также для холодных закусок (канапе, профитролы, тарталетки и др.). В настоящее время пастообразные продукты востребованы на рынке и представлены из смеси продуктов животного (мясо свинины, гуся, утки, курицы, дичи, кролика, рыбы семейства лососевых, осетра горячего копчения, морепродуктов) происхождения, растительных и масложировых добавок. Использование ценного в пищевом отношении мяса и мягких тканей головы осетра позволяет снизить стоимость готовой пастообразной продукции, при этом сохранив ее пищевую ценность и качествен-

ные характеристики. Технология приготовления паст и риегов предусматривает возможность моделирования многокомпонентных пищевых продуктов с использованием подходов пищевой комбинаторики [32, 33]. К рыбному сырью (мясо и мягкие ткани осетра) можно добавить растительные компоненты, при их сочетании возможно получить продукцию с высокими органолептическими показателями, заданной пищевой и энергетической ценностью. Использование ценного вторичного сырья осетровых рыб позволяет получить пастообразную рыбную продукцию с полноценным составом по белку и жиру, с высокими вкусоароматическими и текстурными характеристиками. Это позволит обеспечить расширение ассортимента деликатесных рыбных продуктов из осетровых, доступных для потребителя.

Выводы

Исходя из проведенного анализа строения тела и мышечной ткани, составлена топография срезов тела русского осетра (*Acipenser gueldenstaedtii*) в разных частях (голова, туловище, хвост). На ней схематично

представлены соединительнотканые перегородки на сегментах светлых и темных мышц, скелетный хрящ и скопление разного количества жировой ткани в подкожной, прихрящевой и брюшной зонах. Установлено наличие прирези мяса у головы осетра, визуально схожее с мясом туловища. Отмечен коричневый оттенок и большее количество темных мышц и соединительной ткани в хвостовой части, это связано с повышенной двигательной активностью этой части тела рыбы. Исследование химического состава мяса осетра в разных частях тела (голова, туловище, хвост) показало содержание воды – от 76,0 до 82,9 %; белка – от 14,2 до 18,5 %; жира – от 2,4 до 4,9 %; минеральных веществ – от 0,1 до 0,6 %. В работе установлено снижение содержания жира в мясе в среднем в 2,8 раза по сравнению с параметрами промышленного осетра.

Русский осетр аквакультурного происхождения, так же как и промышленный, по среднему значению содержания белка относится к группе белковых; по среднему значению содержания жира – к среднежирным; промышленный – к жирным. Рыбное сырье с таким составом рекомендуется направлять на производство кулинарных изделий и консервов. В продуктах переработки головы осетра (отварное мясо и мягкие ткани) содержание белка составляло 18,6 и 20,4 %; жира – 12,2 и 16,2 %. Аминокислотный анализ показал, что доля незаменимых аминокислот составляла 42,4 и 38,2 % для мяса и мягких тканей головы осетра. Исследование биологической ценности показало отсутствие лимитирующих незаменимых аминокислот. Для мяса головы осетра основная масса незаменимых аминокислот, находящихся в избытке, приходится на сочетания фенилаланин + тирозин (217,8 %), метионин + цистин (202,2 %); для мягких тканей – на треонин (330,8 %), фенилаланин + тирозин (210,5 %). Биологическая ценность мяса головы осетра (44,1 %) превышала значение показателя для мягких тканей (41,5 %). В жире головы русского осетра содержится 45,8 % мононенасыщенных жирных кислот группы ω -9 и 26,2 % полиненасыщенных жирных кислот, в т. ч. 11,0 % ω -3. В состав жира входят эссенциальные жирные кислоты, образующие

витамин F (линолевая – 14,2 %; линоленовая – 3,4 % и арахидоновая – 0,03 %).

Полученные данные о составе вторичного сырья русского осетра позволят моделировать многокомпонентные пищевые продукты с использованием сырья разного происхождения; разрабатывать готовые к употреблению продукты питания с высокими вкусоароматическими и текстурными характеристиками, пищевой и биологической ценностями; расширить ассортимент рыбных продуктов из осетровых, доступных для массового потребителя.

Критерии авторства

О. С. Якубова – разработка концепции работы; постановка цели и задач исследования; руководство процессом выполнения этапов работы; интерпретация полученных экспериментальных данных и написание рукописи статьи. А. А. Кушбанова – проведение экспериментальных исследований; интерпретация экспериментальных данных; написание рукописи статьи. М. В. Захарова – сбор, систематизация информации по теме работы; обработка и графическое оформление полученных данных; оформление итоговой рукописи статьи.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов в связи с публикацией данной статьи.

Contribution

O.S. Iakubova developed the research concept and plan; supervised the research; interpreted the experimental data; and wrote the manuscript. A.A. Kushbanova conducted the experimental studies; analyzed the experimental data; and wrote the manuscript. M.V. Zaharova wrote the review; provided the infographics; and designed the manuscript.

Conflict of interest

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

Список литературы / References

1. Быкова В. П. Справочник по химическому составу и технологическим свойствам рыб внутренних водоемов. М.: ВНИРО, 1999. 224 с. [Bykova VP. Handbook of chemical composition and technological properties of inland water fish. Moscow: VNIRO; 1999. 224 p. (In Russ.)]
2. Шипулин С. В., Барабанов В. В., Левашина Н. В., Лепилина И. Н., Никитин Э. В., и др. Воспроизводство и состояние запасов водных биоресурсов в низовьях Волги в 2003–2022 гг. Вопросы рыболовства. 2023. Т. 24. № 3. С. 96–119. [Shipulin SV, Barabanov VV, Levashina NV, Lepilina IN, Nikitin EV, et al. Of aquatic biological resources in the lower reaches of the Volga in 2003–2022. Problems of Fisheries. 2023;24(3):96–119. (In Russ.)] <https://doi.org/10.36038/0234-2774-2023-24-3-96-119>
3. 12 августа – Международный день Каспийского моря. Федеральное агентство по рыболовству. [August 12 – International Caspian Sea Day. Federal Agency for Fishery [cited 2025 Aug 23]. (In Russ.)] Available from: <https://fish.gov.ru/news/2025/08/12/12-avgusta-mezhdunarodnyj-den-kaspijskogo-morya/>

4. Росрыболовство: ориентир развития аквакультуры в стране – потребительские предпочтения. Федеральное агентство по рыболовству. [Rosrybolovstvo: The benchmark for aquaculture development in the country is consumer preferences. Federal Agency for Fishery. [cited 2025 Aug 23]. (In Russ.)] Available from: <https://fish.gov.ru/news/2024/03/12/rosrybolovstvo-orientir-razvitiya-akvakultury-v-strane-potrebitelskie-predpochteniya>
5. Якубова О. С., Кушбанова А. А., Олдырев Д. В. Технологический потенциал вторичных ресурсов переработки осетровых объектов товарной аквакультуры Астраханской области. Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Рыбное хозяйство. 2025. № 2. С. 113–121. [Yakubova OS, Kushbanova AA, Oldyrev DV. Technological potential of secondary resources of commercial sturgeon processing aquaculture of the Astrakhan region. Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Fishing industry. 2025;(2):113–121. (In Russ.)] <https://doi.org/10.24143/2073-5529-2025-2-113-121>
6. Харченко О. А., Чертова Е. Н. Комплексная переработка товарных осетровых и веслоноса. Рыбное хозяйство. 2003. № 5. С. 54–57. [Kharchenko OA, Chertova YeN. Complex processing of commerce sturgeons and paddle-fish. Fisheries. 2003;(5):54–57. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/PGGGBZ>
7. Давлетшина Т. А., Шульгина Л. В., Солодова Е. А., Долбнина Н. В., Загородная Г. И. Гибриды осетровых рыб искусственного разведения, размерно-массовая характеристика, пищевая ценность и перспективы использования в технологии консервов. Известия ТИНРО. 2009. Т. 157. С. 291–300. [Davletshina TA, Shulgina LV, Solodova EA, Dolbnina NV, Zagorodnaya GI. Sturgeon hybrids of artificial breeding: size and mass parameters, food value, and prospects of use in technology of conservation. Izvestia TINRO. 2009;157:291–300. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/KUSQMD>
8. Басонов О. А., Судакова А. В. Химический состав и пищевая ценность мяса осетровых рыб разных генотипов при промышленном производстве. Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2022. № 2. С. 178–184. [Basonov OA, Sudakova AV. Chemical composition and nutritional value of meat of different genotypes of sturgeon in industrial production. Vestnik of Ulyanovsk state agricultural academy. 2022;(2):178–184. (In Russ.)] <https://doi.org/10.18286/1816-4501-2022-2-178-184>
9. Михайлова М. В., Прозоровский В. Н., Золотарёв К. В., Ипатова О. М., Михайлов А. Н. и др. Содержание карнозина в мышечной ткани осетровых и их гибридов. Прикладная биохимия и микробиология. 2020. Т. 56. № 3. С. 301–304. [Mikhailova MV, Prozorovskiy VN, Zolotarev KV, Ipatova OM, Mikhailov AN, *et al.* Carnosine levels in the muscle tissues of sturgeons and their hybrids. Applied Biochemistry and Microbiology. 2020;56(3):301–304. (In Russ.)] <https://doi.org/10.31857/S0555109920030083>
10. Артемов А. В., Харенко Е. Н., Баскакова Ю. А. Оценка потенциала мышечной ткани осетровых рыб как основы для создания специализированного питания спортсменов. Индустрия питания. 2023. Т. 8. № 4. С. 36–48. [Artemov AV, Kharenko EN, Baskakova YuA. Potential assessment of sturgeon muscle tissue as a development basis for specialized athletes nutrition. Food Industry. 2023;8(4):36–48. (In Russ.)] <https://doi.org/10.29141/2500-1922-2023-8-4-4>
11. Арнаутков М. В., Артемов Р. В., Бурлаченко И. В., Артемов А. В., Гершунская В. В. и др. Исследование пищевой ценности и функционально-технологических свойств гибрида бестера с русским осетром. Труды ВНИРО. 2018. Т. 171. С. 170–179. [Arnautov MV, Artemov RV, Burlachenko IV, Artemov AV, Gershunskaya VV, *et al.* Research of nutritional value and functional and technological properties of marketable hybrids of Bester with Russian sturgeon. Trudy VNIRO. 2018;171:170–179. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/YRRZFJ>
12. Tang S, Feng G, Gao R, Ren J, Zhou X, *et al.* Thermal gel degradation (Modori) in sturgeon (*Acipenseridae*) surimi gels. Food Chemistry. 2019;84(12):3601–3607. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.14919>
13. Киричко Н. А., Мукатова М. Д., Миронов А. И. О возможности использования гонад товарного осетра и промыслового сазана Волго-Каспийского региона в технологии рыбных консервов. Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Рыбное хозяйство. 2024. № 1. С. 136–148. [Kirichko NA, Mukatova MD, Mironov AI. About the possibility of using commercial sturgeon gonads and commercial carp of the Volga-Caspian region in the technology of canned fish. Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Fishing industry. 2024;(1):136–148. (In Russ.)] <https://doi.org/10.24143/2073-5529-2024-1-136-148>
14. Киладзе А. Б. Технологические свойства шкур русского осетра как перспективного кожевенного сырья. Рыбное хозяйство. 2007. № 1. С. 104–107. [Kiladze AB. Technological characteristics of Russian sturgeon skin as a perspective raw-stock. Fisheries. 2007;(1):104–107. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/HWQID>
15. Якубова О. С., Кушбанова А. А. Биотехнологический потенциал чешуи рыб Астраханской области. Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Рыбное хозяйство. 2024. № 4. С. 136–145. [Yakubova OS, Kushbanova AA. Biotechnological potential of fish scales of the Astrakhan region. Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Fishing industry. 2024;(4):136–145. (In Russ.)] <https://doi.org/10.24143/2073-5529-2024-4-136-145>
16. Rashidul I, Tomoharu Y, Dawei M, Takeya Y, Yumi O, *et al.* Purity and properties of gelatins extracted from the head tissue of the hybrid kalamtra sturgeon. LWT. 2021;142:110944. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.110944>
17. Yuan L, Guo X, Xiong Z, Wang X, Monto AR, *et al.* Effects of sturgeon oil and its Pickering emulsion on the quality of sturgeon surimi gel. Food Chemistry: X. 2024;22:101451. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2024.101451>
18. Volkov VV, Mezenova OYa, Moersel J-T, Kuehn S, Grimm T, *et al.* Hydrolysis products from sockeye (*Oncorhynchus nerka* L.) heads from the Kamchatka Peninsula produced by different methods: Biological value. Foods and Raw Materials. 2021;9(1):10–18. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2021-1-10-18>

19. Voroshilin RA, Kurbanova MG, Yustratov VP, Larichev TA. Identifying bioactive peptides from poultry by-Products. Food Processing: Techniques and Technology. 2022;52(3):545–554. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2022-3-2387>
20. Кротова М. Г., Гришаева И. Н. Коллаген, гидролизированный из сырья маралов: технология получения и биохимический состав. Техника и технология пищевых производств. 2024. Т. 54. № 4. С. 884–896. [Krotova MG, Grishaeva IN. Collagen hydrolysed from maral raw material: Production technology and biochemical composition. Food Processing: Techniques and Technology. 2024;54(4):884–896. (In Russ.)] <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-4-2549>
21. Oslan SNH, Li CX, Shapawi R, Mokhtar RAM, Noordin WN, et al. Extraction and characterization of bioactive fish by-product collagen as promising for potential wound healing agent in pharmaceutical applications: Current trend and future perspective. International of Food Science. 2022;9437878. <https://doi.org/10.1155/2022/9437878>
22. Gao R, Yu Q, Shen Y, Chu Q, Chen G, et al. Production, bioactive properties, and potential applications of fish protein hydrolysates: Developments and challenges. Trends in Food Science and technology. 2021;110:687–699. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.02.031>
23. Wang H, Tu Z. Preparation of high content collagen peptides and study of their biological activities. Food Research International. 2023;174(Part 1):113561. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.113561>
24. Chanmangkang S, Maneerote J, Surayot U, Panya A, You S, et al. Physicochemical and biological properties of collagens obtained from tuna tendon by using the ultrasound-assisted extraction. Journal of Agriculture and Food Research. 2024;15:100984. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2024.100984>
25. Petcharat T, Benjakul S, Karnjanapratum S, Nalinanon S. Ultrasound-assisted extraction of collagen from clown featherback (*Chitala ornata*) skin: Yield and molecular characteristics. Journal of the Science of Food and Agriculture. 2021;101(2):648–658. <https://doi.org/10.1002/jsfa.10677>
26. Hernández-Ruiz KL, López-Cervantes J, Sánchez-Machado DI, Campas-Baypoli ON, Quintero-Guerrero AA, et al. Collagen peptide fractions from tilapia (*Oreochromis aureus* Steindachner, 1864) scales: Chemical characterization and biological activity. Food Bioscience. 2023;53:102658. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2023.102658>
27. Mohanty U, Majumdar RK, Mohanty B, Mehta NK, Parhi J. Influence of the extent of enzymatic hydrolysis on the functional properties of protein hydrolysates from visceral waste of *Labeo rohita*. Food Science Technology. 2021;58(11):4349–4358. <https://doi.org/10.1007/s13197-020-04915-3>
28. Рубан Н. Ю., Резниченко И. Ю. Особенности предпочтений людей пожилого и старческого возраста при формировании рациона. Техника и технология пищевых производств. 2020. Т. 50. № 1. С. 176–184. [Ruban NYu, Reznichenko IYu. Preferences of people of advanced and gerontic age in diet formation. Food Processing: Techniques and Technology. 2020;50(1):176–184. (In Russ.)] <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2020-1-176-184>
29. Grujić S, Grujić M. Factors affecting consumer preference for healthy diet and functional foods. Foods and Raw Materials. 2023;11(2):259–271. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2023-2-576>
30. Лебедева Е. Ю., Неваленная А. А., Золотокопова С. В., Миронов А. И. Исследование потребительских предпочтений рыбной кулинарной продукции. Вестник Астраханского государственного технического университета. 2022. № 1. С. 37–42. [Lebedeva EYu, Nevalennaya AA, Zolotokopova SV, Mironov AI. Research of consumer preferences for fish culinary products. Vestnik of Astrakhan State Technical University. 2022;(1):37–42. (In Russ.)] <https://doi.org/10.24143/1812-9498-2022-1-37-42>
31. Покровский Б. И., Шабельский Д. Л., Кайко А. М., Шаповалов М. Е. Оптимальные оценки повышения глубины переработки рыбного сырья ресурсов пресноводных водоемов в целях развития внутреннего рынка рыбопродукции РФ. International Agricultural Journal. 2022. Т. 65. № 5. Номер статьи 14. [Pokrovskii BI, Shabel'skii DL, Kaiko AM, Shapovalov ME. Optimal estimates of increasing depth processing of fish raw materials freshwater resources for development purposes the domestic market of fish products of the Russian Federation. International Agricultural Journal. 2022;65(5):14. (In Russ.)] https://doi.org/10.55186/25876740_2022_6_5_14
32. Lisitsyn AB, Chernukha IM, Nikitina MA. Russian methodology for designing multicomponent foods in retrospect. Foods and Raw Materials. 2020;8(1):2–11. <http://doi.org/10.21603/2308-4057-2020-1-2-11>
33. Prosekov AYU, Lisitsyn AB, Chernukha IM, Nikitina MA. Designing multicomponent food products. Foods and Raw Materials. 2020;8(2):429–430. <http://doi.org/10.21603/2308-4057-2020-2-429-430>

Дополнительная информация об авторах / Additional information about the authors

Якубова Олеся Сергеевна / Olesia S. Iakubova ORCID 0000-0002-2489-8041; eLIBRARY SPIN 3142-0279
Кушбанова Аделя Адлеровна / Adelia A. Kushbanova ORCID 0000-0001-5429-6693; eLIBRARY SPIN 9328-2366
Захарова Мария Владимировна / Mariya V. Zaharova ORCID 0009-0001-2883-0255; eLIBRARY SPIN 6329-2020

<https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-1-2622>
<https://elibrary.ru/RMZRPB>

Оригинальная статья
<https://fptt.ru>

Биохимический состав и лекарственные свойства *Inonotus obliquus* Pil.



С. С. Буренков*, А. В. Заушинцева

Кемеровский государственный университет, Кемерово, Россия

Поступила в редакцию: 03.10.2025

Принята после рецензирования: 04.11.2025

Принята к публикации: 13.01.2026

*e-mail: serg.burenkoff2017@yandex.ru

© С. С. Буренков, А. В. Заушинцева, 2026



Аннотация.

Чага березовая получила распространение при производстве на основе ее компонентного состава продуктов функционального назначения. Несмотря на высокое содержание химических и биологически активных веществ, существуют проблемы их извлечения, обусловленные сложностью состава чаги березовой. Цель работы – оценить состояние и результативность исследований трутовика скошенного (*Inonotus obliquus* Pil.) в аспекте его multifunctional свойств и практического применения.

Объектами исследования являлись плодовые тела трутовика скошенного (чаги березовой), суспензионная культура клеток *in vitro*. Авторами был заложен лабораторный опыт по получению каллусной культуры клеток. Получена суспензионная культура. С помощью стандартных и общепринятых методов анализировали микроскопические параметры, химический состав, методы введения чаги в культуру *in vitro*, антиоксидантную и антимикробную активность.

Проведен поиск и обобщение научной информации о трутовике скошенном. В работе представлено общее описание морфологии гриба и механизмы взаимодействия с растением-хозяином (березой), химический состав плодового тела, состав биологически активных веществ, культивирование клеток *I. obliquus* в культуре *in vitro*, перспективы использования БАВ в медицине, фармакологии и пищевой биотехнологии. В составе трутовика скошенного выделены жизненно необходимые для организма человека элементы – P^0 , Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} . Обнаружены биологически активные вещества (меланин, витамины С, Е, селен, β -каротин и др.). Основным биологическим компонентом плодового тела чаги является полифенолоксикарбоновый комплекс, представляющий собой водное извлечение и образующий в нем коллоидную полидисперсную систему. Опытным путем подобраны условия получения суспензионной культуры чаги: культивирование в течение 30 суток в темноте при температуре 27 °C и влажности 60–70 %. Наиболее благоприятной питательной средой для выращивания чаги являлась среда № 9 (глюкоза – 40,0; пептон – 5,0; дрожжевой экстракт – 2,0; KH_2PO_4 – 1,0; $MgSO_4$ – 0,5; агар – 8–9; картофельный крахмал – 0,5 г/л). Максимальный индекс роста составил 15,9 г. Антиоксидантная активность водных извлечений имела близкие значения и составляла от 27 до 31 кКл/100 г. Самый высокий антимикробный эффект по отношению к штаммам микроорганизмов выявлен у суспензионной культуры в отношении *Escherichia coli*, *Proteus mirabilis*, *Proteus vulgaris*, *Pseudomonas aeruginosa*. Проведен практический эксперимент по изготовлению функционального продукта из пшеничной муки с использованием экстракта биологически активных веществ суспензионной культуры клеток чаги березовой.

В ходе исследования изучены свойства трутовика скошенного, получен экстракт биологически активных веществ суспензионной культуры клеток чаги березовой и разработан функциональный продукт из пшеничной муки, содержащий комплекс полезных биологически активных веществ. Полученные результаты свидетельствуют о перспективности применения чаги березовой в пищевой промышленности.

Ключевые слова. *Inonotus obliquus* Pil., чага березовая, плодовое тело, органические кислоты, аминокислоты, биологически активные вещества, хромогенный комплекс, культура *in vitro*

Для цитирования: Буренков С. С., Заушинцева А. В. Биохимический состав и лекарственные свойства *Inonotus obliquus* Pil. Техника и технология пищевых производств. 2026. Т. 56. № 1. С. 57–71. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-1-2622>

Biochemical Composition and Medicinal Properties of *Inonotus obliquus* Pil.



Sergey S. Burenkov*, Alexandra V. Zaushintsena

Kemerovo State University, Kemerovo, Russia

Received: 03.10.2025
Revised: 04.11.2025
Accepted: 13.01.2026

*e-mail: serg.burenkoff2017@yandex.ru
© S.S. Burenkov, A.V. Zaushintsena, 2026



Abstract.

Birch chaga is a popular functional component. This fungus is rich in chemical and biologically active substances, but the composition is so complex that their extraction remains a challenge. This article describes the functional and medicinal status of *Inonotus obliquus* Pil. in terms of its prospects for the food industry.

The research featured the conk of *I. obliquus*, its *in-vitro* cell suspension culture, and callus cell culture. A set of standard research methods made it possible to study such aspects as microscopic parameters, chemical composition, and methods of introducing chaga into *in-vitro* culture, as well as the antioxidant and antimicrobial activity of chaga extract.

I. obliquus proved to contain such beneficial elements as P⁰, Na⁺, K⁺, Ca²⁺, and Mg²⁺. The list of biologically active substances included melanin, vitamins C and E, selenium, β -carotene, etc. The main biological component was a polyphenoloxycarbonate complex, an aqueous extract that formed a colloidal polydisperse system. The rational conditions for *I. obliquus* suspension culture were as follows: cultivation for 30 days in the dark at 27 °C and 60–70% humidity. The optimal nutrient medium consisted of 40.0 glucose, 5.0 peptone, 2.0 yeast extract, 1.0 KH₂PO₄, 0.5 MgSO₄, 8–9 agar, and 0.5 g/l potato starch. The highest growth index was 15.9 g. The antioxidant activity across the experimental aqueous extracts were similar, ranging from 27 to 31 kC/100 g. The highest antimicrobial effect was detected against *Escherichia coli*, *Proteus mirabilis*, *Proteus vulgaris*, and *Pseudomonas aeruginosa*.

The experimental functional product from wheat flour and *I. obliquus* was reliably rich in beneficial bioactive substances, which rationalizes the current popularity of chaga fungus in the modern food industry.

Keywords. *Inonotus obliquus* Pil., birch chaga, conk, organic acids, amino acids, biologically active substances, chromogenic complex, culture *in vitro*

For citation: Burenkov SS, Zaushintsena AV. Biochemical Composition and Medicinal Properties of *Inonotus obliquus* Pil. Food Processing: Techniques and Technology. 2026;56(1):57–71. (In Russ.) <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-1-2622>

Введение

Актуальным направлением научных исследований является изучение природных объектов, широко используемых в медицине для получения биологически активных веществ и производства лекарственных препаратов, применяемых для профилактики и лечения заболеваний [1–3]. Такие средства, в отличие от синтетических аналогов, обладают комплексным действием и существенно реже вызывают посттерапевтические осложнения. Перспективным и востребованным объектом для обозначенных целей считается трутовик скошенный, или чага березовая (*Inonotus obliquus*), произрастающая на живых березах (*Betula* L., 1753) и являющаяся источником биологически активных веществ.

В связи с недостаточным количеством исследований и отсутствием свободного доступа к научной медицине принципы народной медицины базируются на преимущественном использовании биологически

активных веществ, выделенных из природных объектов, которые применяют для облегчения симптомов заболеваний.

Начиная с XVI в. плодовые тела и лекарственные препараты на основе *I. obliquus* используют для лечения и профилактики желудочно-кишечных и онкологических заболеваний как на территориях России, Китая, Кореи, так и в западных странах [4, 5]. Так как онкологические и другие заболевания относят к патологиям, связанным с действием свободных радикалов, возникла необходимость получения антиоксидантов из чаги [6]. Данное направление является перспективным ввиду того, что препараты на основе чаги обладают широким спектром биологической активности. Они проявляют высокую радиопротекторную, антиоксидантную, адаптогенную, иммуномодулирующую, антивирусную, антиоксидантную активность [7, 8], регулируют деятельность сердечной [9, 10], дыхательной, нервной систем [11], контролируют активность ферментов

крови [12]. Настои из чаги приводят к понижению артериального давления, лечат дерматит, псориаз, экзему. Ингаляции, проводимые на основе компонентов чаги, проявляют противовоспалительное действие при опухолях гортани и таким образом облегчают дыхание. Чага березовая в порошкообразной форме применяется в качестве присыпки для заживления ссадин, ран и замедления процессов их загноения. Из литературных источников [13–15] известно, что применение биотехнологических приемов при культивировании трутовика скошенного не приводит к образованию полифенолоксикарбонового комплекса, аналогичного природному. В результате получение препаратов на основе *I. obliquus* является перспективной задачей.

Научная новизна работы состоит в том, что впервые собрана коллекция чаги березовой (*I. obliquus*) разного эколого-географического происхождения, определены элементный состав, содержание биологически активных веществ в плодовом теле чаги, антимикробные и антиоксидантные свойства, разработан функциональный продукт на основе биологически активных веществ.

Цель работы – оценить состояние и результативность исследований трутовика скошенного (*I. obliquus*) в аспекте его multifunctional свойств и практического применения.

Объекты и методы исследования

В качестве объектов исследования применяли плодовые тела трутовика скошенного (*Inonotus obliquus* Pil.), материалы каллусных и суспензионных культур клеток *in vitro*. Материалы плодовых тел собраны и идентифицированы лично авторами в лесных сообществах Кемеровской и Новосибирской областей (Россия), в частности с березы повислой (*Betula pendula* Roth.). Снятие плодовых тел трутовика скошенного осуществляли с применением пилы. Для предотвращения повреждений их укладывали в бумажные пакеты. Базидиомы чаги фотографировали и измеряли с помощью линейки. Мелкие фрагменты рассмотрены с применением увеличительной лупы. Сбор материала чаги можно осуществлять круглогодично, но для облегчения поиска лучше находить стволы берез с наростами в период с осени до весны, т. к. в это время они находятся в безлистном состоянии. Базидиомы собирают на живых произрастающих березах. На сухостойных деревьях чага подвержена разрушению (крошению). Такие материалы не являются пригодными.

Для поиска научной литературы использованы базы данных Scopus, Web of Science, eLIBRARY.RU, библиографии пристатейных списков, обзоры конференций. Основными источниками послужили научные журналы, обзоры научных статей, сборники научных конференций, монографии и другие источники за период 2001–2024 гг. Фотодокументы сделаны лично авторами.

В статье представлено общее описание морфологии гриба и механизмы взаимодействия с растением-

хозяином (березой), химический состав плодового тела, состав биологически активных веществ, культивирование клеток *I. obliquus* в культуре *in vitro*, перспективы использования БАВ в медицине, фармакологии и пищевой биотехнологии.

С целью изучения внутреннего строения чаги проведено микроскопирование ее структур согласно ФС.2.5.0103.18. Для приготовления срезов сырье чаги разделили на сегменты 1×1 мм. Затем его замачивали в смеси этилового спирта и глицерина в соотношении 1:1 в течение 3 суток. При рассмотрении поперечного и продольного срезов обнаружены переплетенные гифы, расположенные отверстия и трубчатый гименофор с базидиоспорами.

При изучении химического состава чаги березовой применяли методику выполнения измерений содержания металлов в твердых объектах методом спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (АЭС-ИСП, ПНД Ф 16.1:2.3:3.11-98).

Перед проведением анализа в условиях атомно-эмиссионного спектрометра образцы подвергались пробоподготовке в условиях микроволновой станции минерализации TOPEX+ (PreeKem Ltd.) в условиях МУ 4.1.1482-03, ОФС.1.5.3.0009.15. Точную навеску 0,2 г образца помещали в полимерную емкость из тетрафторэтилена (PTFE) для минерализации, затем добавляли 4 мл 68 % HNO₃. Процедура минерализации была следующей: (1) при 150 °С и давлении 1,82 МПа с нагревом в течение 4 мин, экспозицией в течение 5 мин; (2) при 180 °С и давлении 2,2 МПа с нагревом в течение 1 мин и экспозицией в 4 мин.

Охлажденные образцы фильтровали через фильтр «желтая лента» в полиэтиленовую пробирку объемом 10 мл и разбавляли деионизированной водой в пластиковой пробирке (1:10 об./об.) перед дальнейшим анализом.

Спектры регистрировались с использованием прибора ISP-AES 9820 (Shimadzu, Япония) в условиях ОФС.1.2.1.1.0017. Регистрация пламени – аксиальная.

В работе рассмотрены методы введения чаги в культуру *in vitro*, наиболее благоприятные для получения каллусных культур, твердофазные и жидкофазные питательные среды.

Предварительно получали асептический материал для проведения экспериментов. Для этого экспланты плодового тела гриба, которые в дальнейшем вносили на питательную среду, промывали в водном растворе с мылом и для стерилизации помещали в 10–12 % раствор перекиси водорода (H₂O₂) на 1 мин. Затем производили их ополаскивание в течение 20 мин в дистиллированной стерильной воде. Фрагменты чаги разрезали скальпелем на сегменты 5×5 мм и использовали в качестве эксплантов, которые помещали на агаризованную среду в чашки Петри диаметром 5 см. Использовали 10 вариантов глюкозо-пептонной агаризованной (ГПА) среды, отличающейся по составу глюкозы. Питательные среды автоклавировали

при 15 мин подготовительного и 15 мин основного режима при добавочном давлении 0,7–0,8 атм и температуре 120 °С. Цикл субкультивирования для каллусных культур составил 30 суток.

Для экспериментов по получению каллусных культур клеток *I. obliquus* Pil. использовали среды YEB (бульон с дрожжевым экстрактом), ГПА и ООА (овсяный отвар агаризованный). Каждая из этих сред характеризуется наличием разнообразных питательных компонентов (табл. 1). Наилучшей средой для формирования каллусов оказалась среда ГПА, усовершенствованная лично авторами статьи и отличающаяся компонентным составом (глюкоза – 40,0; пептон – 5,0; дрожжевой экстракт – 2,0; KH_2PO_4 – 1,0; MgSO_4 – 0,5; агар (для приготовления твердой среды) – 8–9; картофельный крахмал – 0,5 г/л).

Все эксперименты проведены в трех-четыре-кратной повторности. Данные представлены как средние значения показателей. Статистический анализ результатов выполнен с помощью однофакторного дисперсионного анализа с использованием программного обеспечения Statistica 6.0 на ПК.

Антиоксидантную активность определяли кулонометрически. Электрогенерацию брома осуществляли на потенциостате при постоянной силе тока 5,0 мА из водных 0,2 М растворов KBr в 0,1 М H_2SO_4 с определением конца титрования амперометрической индукцией с двумя поляризованными платиновыми электродами. В кулонометрическую ячейку вносили 20,0 мл фонового раствора и аликвоту (0,03 мл) исследуемого образца.

Таблица 1. Питательные среды, используемые при культивировании *Inonotus obliquus* Pil.

Table 1. Nutrient media for cultivating *Inonotus obliquus* Pil.

Среда	Состав питательной среды	
	компоненты	массовая концентрация, г/л
YEB	пептон	5,0
	дрожжевой экстракт	1,0
	сахароза	6,6
	$\text{MgSO}_4 \times 7\text{H}_2\text{O}$	3,0
	картофельный крахмал	0,5
	агар (для приготовления твердой среды)	8–9
ГПА	глюкоза	30,0
	пептон	5,0
	дрожжевой экстракт	2,0
	KH_2PO_4	1,0
	MgSO_4	0,5
	картофельный крахмал	0,5
ООА	агар	8–9
	зерна овса	20,0

Исследование антимикробной активности проводили диско-диффузионным методом в соответствии с МУК 4.2.1890-2004. Метод основан на способности антимикробного агента (экстракта) диффундировать из пропитанных им бумажных дисков в питательную среду, угнетая рост микроорганизмов, посеянных на поверхности агара. В качестве тест-штаммов использовали *Escherichia coli*, *Proteus mirabilis*, *Proteus vulgaris*, *Pseudomonas aeruginosa*.

Результаты и их обсуждение

Общее описание морфологии гриба и механизмы взаимодействия с растением-хозяином. *Inonotus obliquus* представляет собой стерильную форму иноотуса скошенного, принадлежащего семейству Гименохетовые (Hymenochaetaceae) [4]. Развитие трутовика скошенного (*I. obliquus*) происходит в местах трещин коры деревьев. Он поражает главным образом стволы, сучья ослабленных деревьев, преимущественно березы повислой (*Betula pendula* Roth, 1751) и березы пушистой (*Betula pubescens* Ehrh., 1789), но может выбирать в качестве местообитания ольху черную (*Alnus glutinosa* Gaertn., 1791), рябину обыкновенную (*Sorbus aucuparia* L., 1753), бук лесной (*Fagus sylvatica* L., 1753), вяз обыкновенный (*Ulmus laevis* Pall.), иву белую (*Salix alba* L., 1753), осину обыкновенную (*Populus tremula* L., 1753) [16]. Споры гриба рассеиваются в воздухе и проникают в места повреждения участков коры (обломанные сучья, морозобоины), начинают прорастать и образовывать мицелий. Затем гифы мицелия с течением времени разрушают древесину и образуют наросты в месте первичного заражения [17, 18]. С течением времени нарост обретает полушаровидную форму и в возрасте 10 лет может достигать массы до 5 кг и более [19].

Трутовик скошенный (*I. obliquus*) произрастает на большей части территории России, Европы, Северной Америки, Казахстана и Белоруссии. Немаловажное значение играют условия обитания чаги. Так, деревья, произрастающие в горах, значительно меньше поражаются чагой из-за того, что их древесина имеет более плотную структуру.

В зоне крепления к березе (род *Betula* L., 1753) ткани чаги имеют пестрый окрас с чередованием пятен ярко-коричневого цвета. Между пестрыми слоями наблюдаются волнообразные бело-желтые полосы меньшего размера. Срез как часть тела гриба имеет овальную форму, включающую крупные и средние структуры различной формы. Ткань среза менее плотная, чем наружная часть. Наружная уплотненная ткань имеет черный цвет, а в ее углублениях обнаруживаются тонкие пластинки наружной ткани бересты. При нажатии на плодовое тело чаги со стороны среза происходит его крошение на структуры темно-коричневого цвета. Также выделяются бело-желтые полосы, которые при прикосновении легко отделяются от тела чаги. Части нароста, располагающиеся у ствола, содержат как гифы гриба, так и клетки древесины (рис. 1).

При отделении наружных черных структур плодового тела происходит формирование более гладкой поверхности выпуклой формы, разделенной белыми, твердыми по структуре тканями бересты. Ткани бересты разделяют плодовое тело гриба на приблизительно одинаковые по форме и размеру доли, которые имеют окраску от темной до буро-коричневой. Эти доли состоят из граней, которые покрыты тонким, но прочным слоем бересты. Можно предположить, что такой слой является защитным для гриба (рис. 2).

Чем ближе доли располагаются к центру тела гриба, тем более яркий цвет они приобретают (от черного до коричневого). Цвет самой бересты также изменяется от темно-коричневого с белыми вкраплениями до серого – в центре плодового тела. Данная закономерность обусловлена тем, что наружная ткань бересты представляет собой отмершие клетки серо-черного цвета. При отделении долей от тела гриба видна структура овальной формы. Чем ближе к центру тела трутовика скошенного, тем заметнее виднеются тяжи мицелия, который имеет полосчатую форму и располагается по граням долей.

Развитие трутовика скошенного (*I. obliquus*) завершается, когда происходит отмирание дерева (рис. 3).



Рисунок 1. Ткани древесины в плодовом теле *Inonotus obliquus* Pil.

Figure 1. Wood tissues in *Inonotus obliquus* Pil. conk

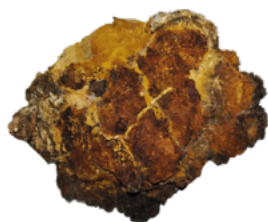


Рисунок 2. Доли плодового тела *Inonotus obliquus* Pil.

Figure 2. Conk lobes of *Inonotus obliquus* Pil.

С третьего на четвертый год жизни, происходит образование плодового тела буро-коричневого цвета, распространяющегося по стволу на 1,0–1,5 см.

Изначально развитие *I. obliquus* осуществляется под корой. На этапе завершения развития плодового тела и его спор происходит разрыв коры с помощью давления упорных пластинок. Затем по мере отслоения коры березы происходит высыпание спор (споруляция) и их перенос ветром на значительные расстояния (рис. 4). Завершение развития чаги происходит после гибели дерева. Затем плодовое тело ссыхается, отмирает и отпадает. Таким образом, цикл развития вновь повторяется [20].

I. obliquus имеет три слоя: внешний (склеротий) – с плотной структурой и черной окраской; средний (плодовое тело) – твердый и плотный слой коричневой окраски; внутренний – с рыхлой, мягкой, пористой структурой желтого оттенка (рис. 5). Данные слои содержат различное количество химических веществ. По данным М. А. Сысоевой и др., во внешнем слое содержатся такие химические элементы, как Si^{+4} , Na^+ , K^+ , Cu^{2+} , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Zn^{2+} , Al^{3+} , Mn^{2+} , Fe^{2+} ; в среднем – Si^{+4} , Na^+ , K^+ , Ag^+ , Cu^{2+} , Mg^{2+} , Al^{3+} , Mn^{2+} , Fe^{2+} ; внутреннем – Si^{+4} , P^0 , Na^+ , K^+ , Ag^+ , Cu^{2+} , Mg^{2+} , Al^{3+} , Mn^{2+} , Fe^{2+} [14]. Состав чаги характеризуется присутствием биогенных элементов, необходимых для организма человека (табл. 2).

Наиболее часто в научной литературе описаны производные циклогексана, известные под названием



Рисунок 3. Первичный выход плодового тела *Inonotus obliquus* Pil.

Figure 3. Early development of *Inonotus obliquus* Pil. conk

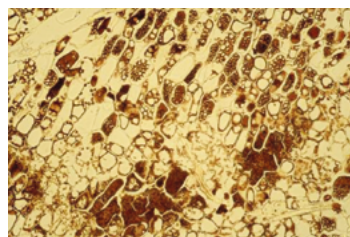


Рисунок 4. Споры плодового тела *Inonotus obliquus* Pil.

Figure 4. Spores of *Inonotus obliquus* Pil. conk

терпены [11, 13, 25]. Терпены – подкласс непредельных углеводов, имеющих химическую формулу C_5H_8 :



Терпены используются в медицине в качестве противовоспалительного, антиоксидантного, спазмолитического и противодиабетического средства [11]. Они являются компонентами бересты, листьев и тела березового гриба (чаги). Из растений терпены выделяют с помощью перегонки с паром и сухой перегонки. Данные вещества обладают высоким биологическим эффектом и служат ценным лекарственным сырьем.

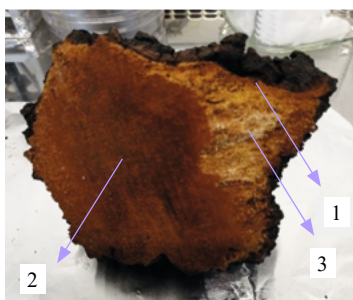


Рисунок 5. Слои плодового тела *Inonotus obliquus* Pil.

Figure 5. Layers of *Inonotus obliquus* Pil. conk

Терпены, выделенные из плодового тела гриба, приводят к снижению выработки оксида азота (NO), что положительно сказывается на подавлении противоопухолевой активности, регуляции синтеза и секреции гормонов, активности тромбоцитов. Они также способны к подавлению выработки активности фермента ксантиноксидазы печени за счет замедления образования активных форм кислорода. Также терпены, выделенные из плодового тела чаги, проявляют ингибирующее действие на фермент α -глюкозидазу, что доказывает их противодиабетические свойства [13].

В составе *I. obliquus* встречаются такие органические кислоты, как щавелевая, уксусная, муравьиная, масляная, винилиновая, агарациновая, бетулиновая, гуминоподобная чаговая [13, 21].

Щавелевая кислота оказывает положительное влияние на перистальтические функции человека за счет ее способности к усвоению кальция. Уксусная кислота, образующаяся в плодовом теле чаги, применяется в медицине для приготовления различных лекарственных препаратов, оказывающих болеутоляющее, жаропонижающее и противовоспалительное действие. В свою очередь, муравьиная кислота применяется в качестве обезболивающего средства и, благодаря противосептическим свойствам, для ингибирования процессов воспаления. Масляная кислота, присутствующая в плодовых телах грибов, способствует торможению

Таблица 2. Содержание биохимических веществ в субстрате *Inonotus obliquus* Pil.

Table 2. Biochemical substances in *Inonotus obliquus* Pil. substrate

Местообитание	Микроэлементы, мкг/г	Макроэлементы, мкг/г	Витамины, мг	Липиды, мг	Органические кислоты, мг	Стероидные вещества, мг
	В	К	В ₁	Диглицериды	Щавелевая	Эргостерол
Кемеровская область [22]	19,56	32,45	2,36	–	0,070	2,7
Россия [23]	27,60	41,71	1,86	20,46	0,040	3,5
Узбекистан; Китай [24]	24,55	39,60	1,27	15,67; 18,48	0,088; 0,066	1,9; 3,1
	Mn	Ca	B ₂	Триглицериды	Уксусная	Ланостерол
Кемеровская область [22]	15,7	2,21	3,78	–	0,070	76,8
Россия [23]	53,4; 0,2	3,50	2,25; 3,57	12,43	0,095; 0,051	–
Узбекистан; Китай [24]	9,8; 6,7	1,97; 3,34	–	9,78; 15,24	0,108; 0,099	–
	Zn	Mg	B ₆		Муравьиная	Инотодиол
Кемеровская область [22]	3,2	0,76	–	–	0,056	173,8
Россия [23]	2,2; 7,5	1,90; –	–	–	–	–
Узбекистан; Китай [24]	26,8; 19,70	–	2,01	–	0,078; 0,046	–
	Mo	Fe	C		Ванилиновая	
Кемеровская область [22]	–	–	–	–	–	–
Россия [23]	1,2	0,02	–	–	0,102	–
Узбекистан; Китай [24]	0,6; 1,0	0,01; 0,05	4,06; 6,45	–	0,077; 0,057	–
	Cu				Масляная	
Кемеровская область [22]	–	–	–	–	0,048	–
Россия [23]	3,28; 4,01	–	–	–	–	–
Узбекистан; Китай [24]	1,90; 2,04	–	–	–	0,076; 0,047	–
	Al					
Кемеровская область [22]	–	–	–	–	–	–
Россия [23]	7,04	–	–	–	–	–
Китай [24]	5,77	–	–	–	–	–

роста и гибели онкологических клеток. Также эта кислота предотвращает процессы воспаления желудочно-кишечного тракта. Винилиновая кислота обладает антибактериальным и противовоспалительным действием, агарициновая проявляет антиоксидантное и противовоспалительное действие [12]. Наиболее известным компонентом чаги является гуминоподобная чаговая кислота, которая оказывает непосредственное лечебное действие при заболеваниях желудочно-кишечного тракта, а также способна уменьшать болевой синдром при онкологических заболеваниях. Ароматические карбоновые кислоты оказывают лечебное действие и имеют противовоспалительные свойства при заболеваниях желудочно-кишечного тракта, а также используются в профилактике онкологических и некоторых других заболеваний [4].

Бетулиновая кислота, известная как фитостерол, содержится в коре березы. Чага березовая (*I. obliquus*) преобразует бетулин из бересты в ее легкоусвояемую форму – бетулиновую кислоту. Она способна стимулировать процессы апоптоза (запрограммированной гибели клеток) онкологических клеток. По своей природе чага является единственным грибом с низким уровнем pH, и за счет этого бетулиновая кислота оказывает влияние на раковые клетки с низким уровнем pH. Эта кислота способна к проявлению противоопухолевой активности без проявления побочных эффектов и токсичности. Клинические исследования бетулиновой кислоты позволили выявить ее фармакологические свойства: антибактериальные, антивирусные, антиоксидантные, противовоспалительные. Также фитостерол используют при лечении ВИЧ из-за его способности к понижению частоты и количества мутаций в генах и хромосомах. Бетулиновая кислота применяется и при лечении острых респираторных заболеваний (ОРЗ), которые впоследствии могут вызвать осложнения пневмонии. Онкологическое действие фитостерола в настоящее время исследуется как химиотерапевтическое средство.

Гуминоподобную чаговую кислоту относят к группе гуминовых кислот, состоящей из смеси органических соединений, которые представляют собой результат деструкции различных растительных остатков и их гумификации. По своей химической структуре чаговая кислота – это высокомолекулярное конденсированное ароматическое соединение. В ней присутствуют фенольные гидроксилы, карбонилы и ацетогруппы простых эфирных связей, которые можно использовать в качестве стимуляторов роста растений, антисептиков и при лечении кожных заболеваний. В состав трутовика скошенного входят 15 аминокислот, среди которых глицин, тирозин, серин, лейцин, метионин, лизин, треонин, гистидин, аспарагиновая и др. [13].

Глицин – заменимая аминокислота, присутствующая в составе белков и влияющая на метаболические процессы тканей мозга, которая проявляет антидепрессивное и седативное влияние [26]. В биологическом

плане глицин участвует в процессах биосинтеза белков, например коллагена, входящего в состав кожи, сухожилий, хрящей и костей, путем поддержания их прочности [16].

Тирозин – заменимая аминокислота, которая оказывает влияние на различные процессы в организме человека, способствуя образованию адреналина и гормонов щитовидной железы [27, 28].

Серин – заменимая аминокислота, которая участвует в метаболических процессах жирных кислот и жира, поддерживая иммунитет.

Лейцин – незаменимая аминокислота, имеющая разветвленную цепочку атомов. При ее дефиците наблюдается нарушение процессов роста, уменьшение массы тела, происходят изменения как в щитовидной железе, так и в почках [28].

Метионин – незаменимая серосодержащая аминокислота, которая играет значительную роль в обмене веществ, способствует увеличению синтеза холина, лецитина и участвует в понижении холестерина в крови.

Среди группы незаменимых аминокислот в исследованиях многих ученых выделен лизин. При его недостатке наблюдается сокращение числа эритроцитов, а затем и понижение гемоглобина, возможны дистрофические преобразования в легких, печени и мышцах и снижение содержания кальция в костях [29].

Исследование свойств аминокислот представляет интерес в связи с их положительным влиянием на организм человека. Эти соединения участвуют в таких жизненно важных процессах, как укрепление иммунной системы и стенок желудка, обеспечение организма энергией и выполнение других функций.

Витамины – сложные биологически активные, низкомолекулярные органические соединения, имеющие различное химическое строение. Витамины входят в состав ферментов, являясь их коферментами. Они необходимы для полноценного протекания физиологических процессов обмена веществ в организме. Большинство витаминов не синтезируются в организме человека, и их дефицит приводит к развитию различных патологических состояний, включая гиповитаминозы и авитаминозы [30]. Источниками витаминов могут служить пищевые продукты животного происхождения, растения, грибы, в том числе и плодовое тело чаги березовой (*I. obliquus*), в составе которой в небольшом количестве присутствуют витамины (B₁ (тиамин), B₂, B₆, C, D, E) [30, 31].

Тиамин (B₁) обычно существует в виде солей, например тиаминхлорида. Известны также тиаминмононитрат и тиаминбромид. Тиаминовые соли достаточно хорошо растворимы в воде и не растворимы в эфире и ацетоне. При нехватке тиамин в организме происходит нарушение процессов окисления углеводов и протекания пластического и энергетического обменов, накопление недоокисленных продуктов в крови и тканях. Рибофлавин необходим для протекания биохимических процессов в организме человека. Он принимает участие

в расщеплении сахаров, продуцирует в костном мозге кровяные тельца. Совместно с фолиевой кислотой и тиаминном позволяет организму лучше усваивать железо. Также рибофлавин включается в процессы работы центральной нервной системы, способствуя улучшению зрительных функций, устойчивости к различным стрессовым факторам и обменным процессам, протекающим в нервной системе. Витамин B_6 образован соединением, состоящим из пиридоксина, пиридоксамина, пиридоксала. Пиридоксин является участником процессов обмена веществ и обнаруживается в составе ферментов, проявляющих роль катализаторов биохимических процессов. При его недостатке нарушается переработка аминокислот, регуляция жирового и углеводного обменов. Он также необходим для высвобождения запасенных в мышечных тканях и печени углеводов в кровь, что обеспечивает снабжение клеток глюкозой. Витамин С играет важную роль в функционировании иммунной системы, участвует в образовании эритроцитов и синтезе коллагена. Он не накапливается в организме, а его избыток, поступающий с пищей или витаминными добавками, выводится с мочой. В результате необходимо постоянное поступление витамина с пищей. Витамин D является единственным жирорастворимым витамином, который организм может самостоятельно синтезировать под влиянием солнечного света. Он участвует в полноценном усвоении организмом фосфора и кальция, влияющих на процессы роста костей, способен подавлять рост раковых клеток и замедлять воспалительные процессы. Также он участвует в регуляции работы нервно-мышечной, эндокринной и иммунной систем организма человека. Витамин Е относится к группе жирорастворимых веществ и представляет собой смесь токоферолов и токотриенолов. Он замедляет процессы старения организма, поддерживает работу половой системы, понижает уровень холестерина и улучшает состояние кожи. Токоферолы и токотриенолы – сильные антиоксиданты, поэтому при их ежедневном поступлении в организм замедляется развитие онкологических заболеваний [2, 30, 40, 41].

Кроме того, обнаружены такие химические элементы, как железо, магний, кремний, цинк, алюминий, сера, фосфор, кальций. Методом рентгенофлуоресцентной адсорбции в *I. obliquus* обнаружены водород (3,6 %), натрий (0,05 %), марганец (0,02 %), хлор (0,33 %), углерод (39 %) и некоторые другие элементы. Плодовые тела чаги березовой также способны накапливать радионуклиды цезия (^{137}Cs), стронция (^{90}Sr) и калия (^{40}K) [30].

Биологически активные вещества *Inonotus obliquus*. Биологически активные вещества, накапливающиеся с течением времени, распределены по внешнему, среднему и внутреннему слоям чаги, где достигается их наибольшая концентрация [31].

Основным биологически активным веществом *I. obliquus* является хромогенный полифенолоксикар-

боновый комплекс (ПФК), который хорошо растворим в воде и имеет восстановительную способность. Он приводит в норму деятельность ферментных систем организма [15]. Биологическую активность данного комплекса изучают с помощью определения количества углеводов (гликозиды, гликопротеины), которые представлены в виде полисахаридов [32]. Полисахариды, содержащиеся в плодовом теле, проявляют противовоспалительное, антиоксидантное, противоопухолевое действие. Противовоспалительные свойства достигаются за счет понижения экспрессии мРНК, экспрессии фактора некроза опухоли- α . Антиоксидантное действие связано с поглощением полисахаридами *I. obliquus* гидроксильных радикалов, H_2O_2 и супероксид-анионов. Кроме антиоксидантных и противовоспалительных свойств, доказано противоопухолевое действие полисахаридов, т. к. они приводят к апоптотической гибели клеток рака легких человека в результате активации киназы печени. Полисахариды оказывают защитный эффект при заболеваниях желудочно-кишечного тракта. Активность данного комплекса определяют по наличию белковых молекул, которые также проявляют биологическую активность. Например, белок лектин, являющийся гликопротеином, стимулирует деление и рост лимфоцитов, подавляет миграцию опухолевых клеток, а также связывает сахара и их остатки, что способствует слипанию эритроцитов и преципитации углеводов. В других трутовиках, например в трутовике окаймленном (*Fomitopsis pinicola* Karst., 1881), трутовике настоящем (*Fomes fomentarius* Fr., 1849), трутовике плоском (*Ganoderma applanatum* Pat., 1887), этот комплекс не обнаружен [6, 13].

Исследования фенольных пигментов чаги позволяют отнести их к такому классу пигментов, как меланины [21]. Меланины – темно-коричневые пигменты, образующиеся у живых организмов, содержащиеся в клетках плодовых тел грибов и находящиеся в плотной взаимосвязи с полисахаридами и белками (рис. 6). Они широко распространены в живой природе и отвечают за их цветное многообразие. Меланины в наибольших концентрациях встречаются в тканях растений, грибов и животных. У животных, включая человека, эти пигменты отвечают за цвет кожи и волос [7].

Меланины трутовика скошенного (*I. obliquus*) имеют высокую антиоксидантную активность и обладают противоопухолевыми, противовоспалительными, энтеросорбционными свойствами при низкой токсичности [14, 18, 33–35].

В ходе метаболизма в организме человека образуются свободные радикалы, нейтрализация которых осуществляется антиоксидантной системой, связанной с иммунитетом и регулирующей скорость старения.

Наиболее важными антиоксидантами *I. obliquus* являются витамины С, Е, селен, β -каротин. Многие аминокислоты, витамины, минералы и микроэлементы растений имеют антиоксидантные свойства, т. к. обнаруживаются в составе ферментов-антиоксидантов.

Чага содержит лигнинолитические ферменты, действующие как биокатализаторы в оксидоредуктазных процессах, например, разлагая лигнин или другие части клеточной стенки. Лигнинолитическая пероксидаза способна к разложению полимеров и некоторых компонентов в окислительном процессе, расщепляя всю структуру лигнина. Таким способом эти ферменты разлагают и полисахаридные соединения в целлюлозе. За счет этих процессов плодовое тело гриба получает необходимые для роста и развития питательные вещества, находящиеся в древесине [36].

В *I. obliquus* содержатся лектины, которые принадлежат классу сложных гликопротеинов. Они принимают активное участие в процессах связывания, транспорта и депонирования углеродсодержащих соединений, выводя их из раствора и тем самым проявляя гипогликемическое действие, что приводит к снижению уровня сахара в крови у больных диабетом. Имеются данные, что лектины способны участвовать в процессах роста и деления лимфоцитов, регуляции иммунологических реакций организма, а также подавлении миграции опухолевых клеток и блокировки их рецепторов [28].

В связи с высокой стоимостью анализов, данные показатели на момент завершения статьи не определены. Результаты будут представлены в другой статье.

Культивирование клеток *Inonotus obliquus* в культуре *in vitro*. При работе с биологическим материалом чаги были соблюдены условия стерильности основного помещения, бокса, инструментария и исследуемого биоматериала.

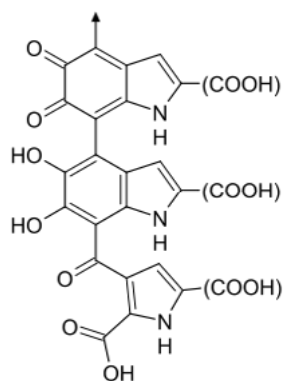


Рисунок 6. Общая структурная формула меланина

Figure 6. The structural formula of melanin

Большое влияние на процессы культивирования чаги оказывают такие параметры среды, как температура, свет, аэрация и влажность. Оптимальные параметры для формирования каллусов: температура 25–27 °С, влажность 65–70 %. Одним из ключевых условий для успешного роста каллуса является исключение доступа света с целью максимального образования и накопления биологически активных веществ. Культивирование каллусных культур клеток проводили в стерильных условиях, в темноте, при 27 °С, влажности 60–70 %.

Согласно данным таблицы 3, оптимальной питательной средой для выращивания каллусных культур *I. obliquus* является среда № 9 (глюкоза – 40,0; пептон – 5,0; дрожжевой экстракт – 2,0; KH_2PO_4 – 1,0; MgSO_4 – 0,5; агар – 8–9; картофельный крахмал – 0,5 г/л).

Для выбора рационального светового режима выращивания каллусных культур чаги регистрировали показатель индекса роста (рис. 7).

В результате максимальный прирост биомассы каллусных культур чаги березовой (*I. obliquus*) составил 15,9 г.

Суспензионную культуру *I. obliquus* получали из выделенных каллусных клеток с последующим переносом в жидкую питательную среду. Для экспериментов отобраны хорошо растущие рыхлые каллусные культуры чаги березовой, которые перенесены с агаризованных питательных сред в жидкие среды аналогичного состава (рис. 8). Суспензионные культуры клеток выращивали в колбах объемом 250 мл, помещали в шейкер-инкубатор для перемешивания содержимого при скорости 80–120 об/мин. Цикл выращивания составил 30 суток. Культивирование суспензионных культур клеток проводили в стерильных условиях, в темноте, при температуре 27 °С, влажности 60–70 %.

Используемые в работе колбы и инструменты стерилизовали в течение 60 мин при 180 °С в сухожаровом шкафу.

Анализировали макро- и микроэлементный состав плодового тела, каллусной и суспензионной культур трутовика скошенного. Данные представлены в таблице 4.

Таким образом, в результате изучения химического состава чаги методом спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (АЭС-ИСП) установлено, что плодовое тело, каллусная и суспензионная культуры данного гриба богаты макро- и микроэлементами. При этом каллусная культура, в отличие от других,

Таблица 3. Результаты определения индекса роста каллусных культур *Inonotus obliquus* Pil.

Table 3. Growth index of *Inonotus obliquus* Pil. callus cultures

Номер среды	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Минеральная основа	ГПА	ГПА	ГПА	ГПА	ГПА	ГПА	ГПА	ГПА	ГПА	ГПА
Глюкоза	8	14	16	20	24	28	32	36	40	44
Индекс роста каллусных культур	11,2	8,8	7,3	9,5	8,3	9,2	10,1	8,5	15,9	2,7

содержит наибольшее количество кальция, магния, фосфора, калия. Это объясняется тем, что для улучшения роста каллуса среда для его индукции включает агар и смесь макро- и микроэлементов. В результате каллус может накапливать определенные химические элементы в зависимости от условий культивирования. Полученные результаты согласуются с литературными данными [14, 21, 22].

Для определения антиоксидантных свойств водных вытяжек чаги березовой применяли кулонометрический метод оценки антиоксидантной активности с помощью электрогенерированного брома (табл. 5).

Антиоксидантная активность водных извлечений имеет близкие значения: от 27 до 31 кКл/100 г.

Антимикробные свойства чаги оценивали диско-диффузионным методом. В качестве тестовых микроорганизмов выбрали бактерии *Escherichia coli*, *Proteus mirabilis*, *Proteus vulgaris*, *Pseudomonas aeruginosa*. Результаты определения антимикробных свойств представлены в таблице 6.

Проведенные исследования подтверждают высокую антимикробную активность чаги березовой. Наибольший антимикробный эффект по отношению к штаммам микроорганизмов выявлен у суспензионной культуры.

Выявленные у культур чаги антиоксидантные и антимикробные свойства, обусловленные присутствием в составе биологически активных веществ, позволяют рассматривать их в качестве перспективного сырья для создания функциональных продуктов широкого спектра биологического действия.

Перспективы использования БАВ в медицине и пищевой биотехнологии. В настоящее время известен ряд промышленных препаратов на основе сырья из чаги. Производители биологически активных добавок, фармацевтических, косметических средств используют в качестве материала для производства своей продукции сырье чаги березовой (*I. obliquus*). В качестве примера можно привести такие продукты, как «Драже жизни» и коктейль «Тростинка». В их состав входят экстракт чаги, молочная закваска, лактобактерии, микроэлементы, аминокислоты, фруктовый пектин. Такие продукты предназначены для больных с онкологическими заболеваниями, гастритами, язвой желудка. Также их рекомендуется употреблять людям, склонным к аллергическим реакциям. Известны препараты «Бефунгин», «Чаговит» и «Чаголюкс», которые включают в себя экстракт чаги, фолиевую кислоту, витамины (В₁, В₂, В₆, С). Их также рекомендуют к употребле-

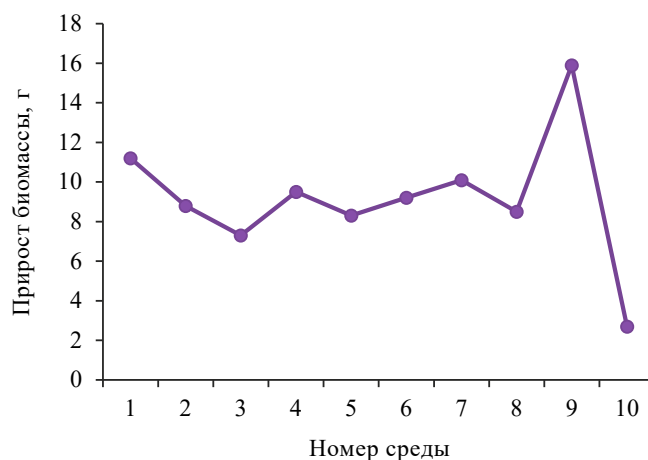


Рисунок 7. Зависимость индекса роста каллусной культуры *Inonotus obliquus* Pil. от питательной среды

Figure 7. Effect of nutrient medium on growth index of *Inonotus obliquus* Pil. callus culture

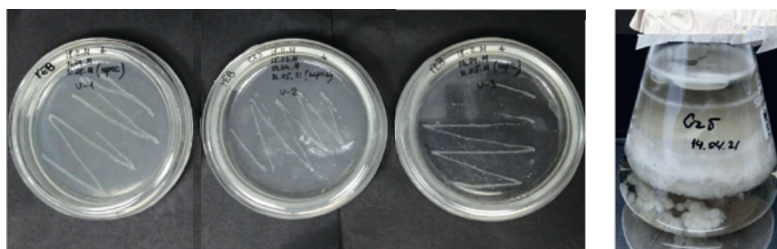


Рисунок 8. Твердофазная и суспензионная культуры *Inonotus obliquus* Pil.

Figure 8. Solid-phase and suspension cultures of *Inonotus obliquus* Pil.

нию при заболеваниях желудочно-кишечного тракта, при различных опухолях из-за их способности проявлять противовоспалительное и общеукрепляющее действие. Такие препараты приводят к подавлению болевого синдрома [18, 37].

В отоларингологии настой на основе трутовика скошенного (*I. obliquus*) применяется в качестве профилактического средства при опухолях гортани. В результате происходит улучшение самочувствия больных и устраняется хрипота голоса. Лечение с помощью данного препарата способствует уменьшению воспалительного процесса и улучшению дыхания. После

снятия отежности лучше удастся исследовать опухоль, легче провести биопсию и назначить дальнейшее лечение. Кроме того, чагу используют в стоматологии для профилактики и лечения пародонтоза. Прерогатива такого метода – точность дозирования используемого вещества [7, 26].

Наиболее известным препаратом является экстракт березового гриба – бефунгин. Он повышает защитные реакции организма, способствует активации обмена веществ центральной нервной системы, повышает биоэлектрическую активность мозга, а также понижает артериальное и венозное давление. Бефунгин

Таблица 4. Результаты определения макро- и микроэлементного состава плодового тела, каллусной и суспензионной культур *Inonotus obliquus* Pil.

Table 4. Macro- and microelement composition of conk, callus culture, and suspension culture of *Inonotus obliquus* Pil.

Растительное сырье	Определяемый показатель	Результат измерения, мг/кг	Методика измерений
<i>Inonotus obliquus</i> Pil., плодовое тело	Бор (B)	4,1 ± 1,2	ПНД Ф 16.1:2.3:3.11-98
	Кальций (Ca)	395,4 ± 118,6	
	Кобальт (Co)	< 0,1	
	Медь (Cu)	2,4 ± 0,5	
	Железо (Fe)	278,1 ± 77,9	
	Магний (Mg)	632,6 ± 189,8	
	Марганец (Mn)	56,4 ± 16,9	
	Молибден (Mo)	0,4 ± 0,2	
	Натрий (Na)	58,6 ± 23,4	
	Сера (S)	143 ± 43	
	Цинк (Zn)	15,4 ± 3,1	
	Фосфор (P)	157,7 ± 47,3	
<i>Inonotus obliquus</i> Pil., каллусная культура	Калий (K)	26612,0 ± 10644,8	ПНД Ф 16.1:2.3:3.11-98
	Бор (B)	1,0 ± 0,3	
	Кальций (Ca)	2275,7 ± 682,7	
	Кобальт (Co)	0,10 ± 0,04	
	Медь (Cu)	0,6 ± 0,1	
	Железо (Fe)	61,3 ± 17,2	
	Магний (Mg)	2202,7 ± 660,8	
	Марганец (Mn)	8,7 ± 2,6	
	Молибден (Mo)	0,9 ± 0,4	
	Натрий (Na)	296,7 ± 118,7	
	Сера (S)	3248 ± 974	
	Цинк (Zn)	24,8 ± 5,0	
<i>Inonotus obliquus</i> Pil., суспензионная культура	Фосфор (P)	8590,9 ± 2577,3	ПНД Ф 16.1:2.3:3.11-98
	Калий (K)	9906,1 ± 3962,4	
	Бор (B)	4,8 ± 1,4	
	Кальций (Ca)	553,8 ± 166,1	
	Кобальт (Co)	0,5 ± 0,2	
	Медь (Cu)	0,3 ± 0,1	
	Железо (Fe)	< 5,0	
	Магний (Mg)	294,3 ± 88,3	
	Марганец (Mn)	2,4 ± 0,7	
	Молибден (Mo)	0,2 ± 0,1	
	Натрий (Na)	45,4 ± 18,2	
	Сера (S)	446 ± 134	
	Цинк (Zn)	< 5,0	ПНД Ф 16.1:2.3:3.11-98
	Фосфор (P)	367,1 ± 110,1	
	Калий (K)	531,6 ± 212,6	

Таблица 5. Антиоксидантная активность водных вытяжек *Inonotus obliquus* Pil.Table 5. Antioxidant activity of *Inonotus obliquus* Pil.

Образец чаги	Антиоксидантная активность, кКл/100 г
№ 1	27,12 ± 0,20
№ 2	28,26 ± 0,30
№ 3	27,06 ± 0,20
№ 4	29,61 ± 1,70
№ 5	31,78 ± 0,20

Таблица 6. Антимикробная активность *Inonotus obliquus* Pil. разных популяцийTable 6. Antimicrobial activity of *Inonotus obliquus* Pil. across populations

Микроорганизмы	Суспензионная культура	Интактное растение (контроль)
<i>Escherichia coli</i>	+	+
<i>Proteus mirabilis</i>	+	±
<i>Proteus vulgaris</i>	+	+
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	+	+

Примечание: «–» – рост тест-культуры; «+» – отсутствие роста; «±» – угнетение роста.

Note: “–” – growth detected; “+” – no growth detected; “±” – growth inhibited.

обладает иммуномодулирующим и обезболивающим действием, повышая сопротивляемость желудочно-кишечного тракта (в частности, его слизистых оболочек) к действию пищеварительного сока и восстанавливая работу желез пищеварительной системы [16].

В пищевой промышленности трутовик скошенный (*I. obliquus*) используют при изготовлении продуктов питания: безалкогольных напитков, к которым относят чаи (ЕТЕА), сиропы (Тайга внутри), прохладительные, лечебно-профилактические напитки (Чагачино). Также на его основе производят ликеро-водочную продукцию, например различные настойки, бальзамы (Бефунгин) [5]. Из пищевых продуктов, в состав которых входит чага, включают желейные мармелады, медовые композиции с чагой и т. д. [6].

Одни и те же препараты, изготовленные на основе трутовика скошенного (*I. obliquus*), можно отнести как к фармации, так и к косметологии (например кремы, бальзамы). Производство препаратов, в основе которых содержится чага, опирается на исследования фармацевтической и пищевой промышленности.

Таким образом, продукты на основе компонентов чаги содержат ряд полезных биологически активных веществ, благодаря чему они широко применяются в современной медицине, фармацевтике, косметологии, химической и пищевой промышленности.

Для поддержания здоровья важен повседневный состав рациона, который должен включать белки живот-

ного и растительного происхождения, витамины, масла и жиры, жизненно важные микроэлементы, биологически активные вещества, обладающие антиоксидантными и антимикробными свойствами [38, 39]. Для поддержания ферментативной системы необходимо создание продуктов функционального питания на основе включения в их состав естественного фонда микронутриентов, биологически активных веществ, растворимых и нерастворимых пищевых волокон, витаминов, макро- и микроэлементов.

Для решения обозначенной проблемы разработан функциональный продукт из пшеничной муки с использованием экстракта биологически активных веществ суспензионной культуры клеток чаги березовой.

В практический эксперимент включены хлебцы хрустящие. Они соответствуют ГОСТ 9846-88. В эксперименте использовали экстракт чаги, полученный из биомассы суспензионных культур клеток *in vitro*. В нем идентифицирован широкий спектр биологически активных веществ, причем содержание таких соединений, как меланин, витамины С и Е, селен и β -каротин, выше, чем в интактном растении. Данные вещества обуславливают выраженное антимикробное и антиокислительное действие *I. obliquus*. Кроме того, меланин самостоятельно обладает рядом функциональных свойств: радиопротекторными, стимулирующими перистальтику желудочно-кишечного тракта, восстанавливающими слизистую оболочку пищеварительных и дыхательных путей после воспалительных процессов, влияющими на внутриклеточное дыхание тканей и общий обмен веществ.

Выводы

В современном обществе наблюдается тенденция к увеличению спроса на биологически активные добавки, пищевые продукты растительного происхождения, имеющие высокую биологическую и пищевую ценность. В этом отношении интересен трутовик скошенный (*Inonotus obliquus* Pil.), который с давних времен применяется в медицине для профилактики заболеваний. Химический состав *I. obliquus* достаточно, поэтому существует необходимость последовательного исследования его биологически активных веществ. Основным биологическим компонентом плодового тела чаги является полифенолоксикарбонный комплекс, представляющий собой водное извлечение и образующий коллоидную полидисперсную систему.

Трутовик скошенный имеет три слоя – внешний, средний и внутренний. По данным М. А. Сысоевой и др., каждый из этих слоев имеет различное содержание химических элементов, включая биогенные элементы, выступающие жизненно необходимыми для организма человека (P^0 , Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} и др.) [14]. В его составе также выявлены такие важные для новой фармакологической, лечебной, пищевой, косметологической продукции компоненты, как меланин, витамины С, Е, селен, β -каротин.

Обоснованы оптимальные параметры получения каллусной и суспензионной культуры клеток *in vitro* чаги березовой (*I. obliquus*) и изучены ростовые характеристики культуры. Условия получения суспензионной культуры чаги: культивирование в течение 30 суток, в темноте, при температуре 27 °С и влажности 60–70 %. На основании полученных результатов выявлено, что наиболее благоприятной питательной средой для выращивания чаги является среда № 9 (глюкоза – 40,0; пептон – 5,0; дрожжевой экстракт – 2,0; KH_2PO_4 – 1,0; MgSO_4 – 0,5; агар – 8–9; картофельный крахмал – 0,5 г/л). Максимальный индекс роста составил 15,9 г.

Определены физико-химические свойства, антиоксидантная и антимикробная активность водных извлечений трутовика скошенного (*I. obliquus*). Антиоксидантная активность водных извлечений имеет близкие значения и составляет от 27 до 31 кКл/100 г. Также определена антимикробная активность. Самый высокий антимикробный эффект по отношению к штаммам микроорганизмов установлен у суспензионной культуры в отношении *Escherichia coli*, *Proteus mirabilis*, *Proteus vulgaris*, *Pseudomonas aeruginosa*.

Разработан функциональный продукт из пшеничной муки с использованием экстракта биологически активных веществ трутовика скошенного (*I. obliquus*), имеющий ряд полезных биологически активных веществ, которые обуславливают его активное применение в современной пищевой промышленности.

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 contributed equally to this work and bear equal responsibility for any potential plagiarism.

Conflict of interest

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

Список литературы / References

1. Babich O, Prosekov A, Zaushintsena A, Sukhikh S, Dyshlyuk L, *et al.* Identification and quantification of phenolic compounds of Western Siberia *Astragalus danicus* in different regions. *Heliyon*. 2019;5(8):e02245. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02245>
2. Sukhikh S, Babich O, Prosekov A, Patyukov N, Ivanova S. Future of chondroprotectors in the treatment of degenerative processes of connective tissue. *Pharmaceutics*. 2020;13(9):220. <https://doi.org/10.3390/ph13090220>
3. 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>
4. Усольцева О. Н., Оленников Д. Н., Потупчик Т. В., Окладникова Е. В., Игнатюк А. В. Гриб березовый (чага): характеристика химического состава, биологической активности и продуктов переработки. *Фармация*. 2023. Т. 72. № 4. С. 58–64. [Usoltseva ON, Olennikov DN, Potupchik TV, Okladnikova EV, Ignatyuk AV. Birch mushroom (chaga): Characteristics of the chemical composition, biological activity and processed products. *Farmatsiya*. 2023;72(4):58–64. (In Russ.)] <https://doi.org/10.29296/25419218-2023-04-08>
5. Kou R-W. Anti-neuroinflammatory polyoxygenated lanostanoids from Chaga mushroom *Inonotus obliquus*. *Phytochemistry*. 2021;184:112647. <https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2020.112647>
6. Усольцева О. Н., Оленников Д. Н., Потупчик Т. В. Оценка качества и биологической активности экстракта березового гриба чага «БиоЧага». *Фармация*. 2022. Т. 71. № 2. С. 33–40. [Usoltseva ON, Olennikov DN, Potupchik TV. Evaluation of the quality and biological activity of the «BioChaga» birch fungus extract. *Farmatsiya*. 2022;71(2):33–40. (In Russ.)] <https://doi.org/10.29296/25419218-2022-02-06>
7. Кузнецова О. Ю., Шаехов М. Ф., Зиятдинова Г. К., Будников Г. К. Экстракты и меланины чаги, полученные после плазменной обработки сырья. *Ученые записки Казанского университета*. 2019. Т. 161. № 2. С. 211–221. [Kuznetsova OYu, Shaehov MF, Ziyatdinova GK, Budnikov GC. Chaga extracts and melanins after plasma treatment of raw material. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta*. 2019;161(2):211–221. (In Russ.)] <https://doi.org/10.26907/2542-064X.2019.2.211-221>
8. Patel S. Chaga (*Inonotus obliquus*) mushroom: Nutraceutical assessment based on latest findings. In: *Emerging Bioresources with Nutraceutical and Pharmaceutical Prospects*. 2015. pp. 115–126. https://doi.org/10.1007/978-3-319-12847-4_11
9. Ильичева Т. Н., Ананько Г. Г., Косогова Т. А., Олькин С. Е., Омигов В. В. и др. Противовирусная активность меланина из чаги (*Inonotus obliquus*), полученного на основе культивирования штамма F-1244, выделенного в чистую культуру. *Химия растительного сырья*. 2020. № 2. С. 283–289. [Ilyicheva TN, Anan'ko GG, Kosogova TA, Olkin SY, Omigov VV, *et al.* Antiviral activity of the melanin from birch fungus (*Inonotus obliquus*) obtained by cultivating F-1244 strain isolating to pure culture. *Chemistry of plant raw material*. 2020;(2):283–289. (In Russ.)] <https://doi.org/10.14258/jcprm.2020025167>

10. 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. [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.)] <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2023-1-2418>
11. Шадеркина В. А., Шадеркин И. А. Терпены и их применение в клинической практике. Экспериментальная и клиническая урология. 2019. № 1. С. 77–80. [Shaderkina VA, Shaderkin IA. Terpenes and their application in clinical practice. Experimental and clinical urology. 2019;(1):77–80. (In Russ.)] <https://doi.org/10.29188/2222-8543-2019-11-1-77-80>
12. Величко Н. А., Рыгалова Е. А., Шароглазова Л. П., Смольникова Я. В. Разработка рецептуры безалкогольного напитка на основе артезианской воды и сублимированного экстракта березового гриба (*Inonotus obliquus*). Вестник КрасГАУ. 2022. № 4. С. 140–146. [Velichko NA, Rygalova EA, Sharoglazova LP, Smolnikova YaV. Development of a non-alcoholic drink based on artesian water and a freezed birch fungus (*Inonotus obliquus*) extract. Bulletin of KSAU. 2022;(4):140–146. (In Russ.)] <https://doi.org/10.36718/1819-4036-2022-4-140-146>
13. Peng H, Shahidi F. Bioactive compounds and bioactive properties of Chaga (*Inonotus obliquus*) mushroom: A review. Journal of Food Bioactives. 2020;12:9–75. <https://doi.org/10.31665/JFB.2020.12245>
14. Сысоева М. А., Уразлина Л. Н., Хабибрахманова В. Р., Григорьева Т. В., Сысоева Е. В. Выделение штамма *Inonotus obliquus* и интенсификация роста культуры при твердофазном культивировании. Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2020. Т. 10. № 1. С. 95–106. [Sysoeva MA, Urazlina LN, Khabibrakhmanova VR, Grigoryeva TV, Sysoeva EV. Isolation of the *Inonotus obliquus* chaga mushroom strain and intensification of a culture growth during solid-phase cultivation. Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology. 2020;10(1):95–106. (In Russ.)] <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2020-10-1-95-106>
15. Sagayama K, Tanaka N, Fukumoto T, Kashiwada Y. Lanostane-type triterpenes from the sclerotium of *Inonotus obliquus* (Chaga mushrooms) as proliferative agents on human follicle dermal papilla cells. Journal of Natural Medicines. 2019;73:597–601. <https://doi.org/10.1007/s11418-019-01280-0>
16. Шишкова В. Н., Нарциссов Я. Р., Титова В. Ю., Шешегова Е. В. Молекулярные механизмы, определяющие применение комбинации глицина и цинка в коррекции основных проявлений стресса и тревоги. Фармация и фармакология. 2022. Т. 10. № 5. С. 404–415. [Shishkova VN, Nartsissov YR, Titova VY, Sheshegova EV. Molecular mechanisms defining application of glycine and zinc combination in correction of stress and anxiety main manifestations. Pharmacy & Pharmacology. 2022;10(5):404–415. (In Russ.)] <https://doi.org/10.19163/2307-9266-2022-10-5-404-415>
17. Brydon-William R, Munck IA, Asbjornsen H. Incidence and ecology of the chaga fungus (*Inonotus obliquus*) in hardwood new england – Acadian forests. Canadian Journal of Forest Research. 2021;51(1):122–131. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2020-0144>
18. Burmasova MA. Melanins of *Inonotus Obliquus*: Bifidogenic and antioxidant properties. Biomolecules. 2019;9(6):248. <https://doi.org/10.3390/biom9060248>
19. Szychowski KA. *Inonotus obliquus* – from folk medicine to clinical use. Journal of Tradit Complement Med. 2020;11(4):293–302. <https://doi.org/10.1016/j.jtcme.2020.08.003>
20. Ding X, Ge B, Wang M, Zhou H, Sang R, et al. *Inonotus obliquus* polysaccharide ameliorates impaired reproductive function caused by *Toxoplasma gondii* infection in male mice via regulating Nrf2-PI3K/AKT pathway. International Journal of Biological Macromolecules. 2020;151:449–458. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.02.178>
21. Зейле Л. А., Новиков И. В., Петрова Е. В., Рабцевич Е. С. Элементный состав чаги березовой трутовика косотрубчатого (*Inonotus obliquus*). Химия растительного сырья. 2022. № 1. С. 251–260. [Zeyle LA, Novikov IV, Petrova EV, Rabcevich ES. Elemental composition of chaga mushroom (*Inonotus obliquus*). Chemistry of plant raw material. 2022;(1):251–260. (In Russ.)] <https://doi.org/10.14258/jcprm.2022019738>
22. Попов А. И., Шпанько Д. Н. Макро- и микроэлементы чаги, заготовленной в Кемеровской области и Республике Тыва. Фармация на современном этапе – проблемы и достижения: сб. науч. тр. Москва; 2000. Т. XXXI. С. 251–253. [Popov AI, Shpanko DN. Macro- and microelements of chaga mushrooms harvested in the Kemerovo Region and the Republic of Tyva. Current Pharmacy: Problems and Achievements: A Collection of Sci. Papers. Moscow; 2000;XXXI:251–253. (In Russ.)]
23. Баландайкин М. Э. Химическая структура и лечебные свойства чаги. Фармация. 2013. № 5. С. 52–55. [Balandaikin ME. The chemical structure and healing properties of shelf fungus (*Polyporus sulphureus*). Pharmacy. 2013;(5):52–55. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/RADOTB>
24. Fenqin Z, Xia G, Chen L, Zhao J, Xie Z, et al. Chemical constituents from *Inonotus obliquus* and their antitumor Activities. Journal of Natural Medicines. 2016;70(4):2–11. <https://doi.org/10.1007/s11418-016-1002-4>
25. Гревцова С. А., Рехвиашвили Э. И., Айларова М. К., Кабулова М. Ю., Гагиева Л. Ч. Характеристика терпенов, входящих в состав некоторых представителей семейства Crassulaceae, DC. Рода *Sedum* S. L., произрастающих в условиях РСО – Алалия. Вестник НГАУ. 2024. № 2. С. 48–54. [Grevtsova SA, Rekhviashvili EI, Aylarova MK, Kabulova MY, Gagieva LCh. Characteristics of some biologically active substances of a number of terpenes for representatives of the Crasulaceae DC family the Genus *Sedum* S. L., growing in the RSO – Alania. Bulletin of NSAU (Novosibirsk State Agrarian University). 2024;(2):48–54. (In Russ.)] <https://doi.org/10.31677/2072-6724-2024-71-2-48-54>

26. Chaturvedi D. Chapter 6 – Recent developments in the anti-inflammatory potential of sesquiterpene lactones and their semisynthetic analogs. In: Brahmachari G, editor. Discovery and Development of Anti-Inflammatory Agents from Natural Products. 2019. pp. 185–205. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816992-6.00006-1>
27. Fernandes CSM, Teixeira GDG, Iranzo O, Roque AA. Engineered protein variants for bioconjugation. In: Sarmiento B, das Neves J, editors. Biomedical Applications of Functionalized Nanomaterials. 2018. pp. 105–138. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323050878-0.00005-7>
28. Раганина К. Т., Тлеубаева М. И., Жандабаева М. А., Кусниева А. Е., Капсальямова Э. Н. и др. Влияние методов экстрагирования гриба чага (*Inonotus obliquus*) на получение экстрактов с более высоким содержанием БАВ. Технология фармацевтического производства. 2024. № 3. С. 226–232. [Raganina KT, Tleubayeva MI, Zhandabayeva MA, Kusnieva AE, Kapsalyamova EN, et al. Chaga mushroom (*Inonotus obliquus*) extraction methods for obtaining an extract with a high content of biological active substances. Pharmaceutical Production Technology. 2024;(3):226–232. (In Russ.)] <https://doi.org/10.53511/pharmkaz.2024.58.79.027>
29. Лысыков Ю. А. Аминокислоты в питании человека. Экспериментальная и клиническая гастроэнтерология. 2012. № 2. С. 88–105. [Lysikov YuA. Amino acids in human nutrition. Experimental and Clinical Gastroenterology Journal. 2012;(2):88–105. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/TBJPRX>
30. Буренков С. С. Макро- и микроэлементный состав трутовика скошенного (*Inonotus obliquus* Pil.). Генофонд и селекция растений. 2024. С. 80–83. [Burenkov SS. Macro- and microelement composition of beveled tinder (*Inonotus obliquus* Pil.). Plant Gene Pool and Breeding. 2024;80–83. (In Russ.)] <https://doi.org/10.18699/GPB2024-21>
31. Wontcheu Fotso YA, Ghazi S, Belkaid A, Soucy J, Tremblay L, et al. Extraction, chemical composition, antiradical capacity, and photoprotective effect of *Inonotus obliquus* from Eastern Canada. Journal of Nutraceuticals. 2023;3(3):380–402. <https://doi.org/10.3390/nutraceuticals3030029>
32. Гюльбякова Х. Н. Лекарственная композиция на основе березового гриба чаги. Фармацевтическая химия. 2022. № 12. С. 1–6. [Gyulbyakova KN. A medical composition based on shelf fungus. Pharmaceutical Chemistry. 2022;(12):1–6. (In Russ.)] <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.126.6>
33. Burmasova MA, Sysoeva MA. Chemical composition and biological activity of the BuOH fraction from chaga melanin. Pharmaceutical Chemistry Journal. 2017;51(4):292–294. <https://doi.org/10.1007/s11094-017-1601-8>
34. Duru KC, Kovaleva EG, Danilova IG, van der Bijl P. The pharmacological potential and possible molecular mechanisms of action of *Inonotus obliquus* from preclinical studies. Phytotherapy Research. 2019;33(8):1966–1980. <https://doi.org/10.1002/ptr.6384>
35. Wong JH, Ng TB, Chan HHL, Liu Q, Man GCW, et al. Mushroom extracts and compounds with suppressive action on breast cancer: Evidence from studies using cultured cancer cells, tumor-bearing animals, and clinical trials. Applied Microbiology and Biotechnology. 2020;104(11):4675–4703. <https://doi.org/10.1007/s002253-020-10476-4>
36. Yang M, Belwal T, Devkota HP, Li L, Luo Z. Trends of utilizing mushroom polysaccharides (MPs) as potent nutraceutical components in food and medicine: A comprehensive review. Trends in Food Science & Technology. 2019;92:94–110. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.08.009>
37. Румянцева О. Н. Изменение состава пектиновых веществ при замораживании и хранении растительной продукции. Техника и технология пищевых производств. 2024. Т. 54. № 3. С. 495–507. [Rumiantceva ON. Pectin changes during freezing and storage of plant products. Food Processing: Techniques and Technology. 2024;54(3):495–507. (In Russ.)] <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-3-2522>
38. Stepanova E, Lugovaya EA. Macro- and microelements in some species of marine life from the Sea of Okhotsk. Foods and Raw Materials. 2021;9(2):302–309. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2021-2-302-309>
39. Wei Y-M, Yang L, Mei WL, Chen HQ, Cai CH, et al. Phenolic compounds from the sclerotia of *Inonotus obliquus*. Natural Product Research. 2020;36(9):2413–2417. <https://doi.org/10.1080/14786419.2020.1833202>
40. Биоактивные вещества геропротекторной направленности / А. Д. Фокина [и др.] // Техника и технология пищевых производств. 2024. Т. 54. № 2. С. 423–435. [Fokina AD, Vesnina AD, Frolova AS, Chekushkina DYU, Proskuryakova LA, Aksenova LM. Bioactive AntiAging Substances: Geroprotectors. Food Processing: Techniques and Technology. 2024;54(2):423–435. (In Russ.)] <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-2-2517>
41. Бородина Е. Е., Козлова О. В., Богер В. Ю., Проскурякова Л. А., Юстратов В. П. Листья пасленовых – источники антиоксидантов и витамина D. Техника и технология пищевых производств. 2025. Т. 55. № 1. С. 197–213. [Borodina EE, Kozlova OV, Boger VYu, Proskuryakova LA, Yustratov VP. Solanaceae Leaves as are Sources of Antioxidants and Vitamin D. Food Processing: Techniques and Technology. 2025;55(1):197–213. (In Russ.)] <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2025-1-2565>

Дополнительная информация об авторах / Additional information about the authors

Буренков Сергей Сергеевич / Sergey S. Burenkov ORCID 0000-0001-7591-1413; eLIBRARY SPIN 8474-6398
Заушинцева Александра Васильевна / Alexandra V. Zaushintsena ORCID 0000-0003-4645-828X; eLIBRARY SPIN 4324-6460

<https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-1-2623>
<https://elibrary.ru/QQWOUG>

Оригинальная статья
<https://fptt.ru>

Электронно-микроскопические и реологические исследования структуры концентрированного молочного продукта с сахаром и сахарозаменителем



С. А. Куренков^{1,*}, Л. А. Куренкова¹,
И. Т. Смыков², А. И. Гнездилова¹

¹ Вологодская государственная молочнохозяйственная академия имени Н. В. Верещагина^{ROR}, Вологда, Россия

² Всероссийский научно-исследовательский институт маслоделия и сыроделия^{ROR}, Углич, Россия

Поступила в редакцию: 22.10.2025

Принята после рецензирования: 19.12.2025

Принята к публикации: 13.01.2026

*e-mail: kurenkovser.35@yandex.ru

© С. А. Куренков, Л. А. Куренкова, И. Т. Смыков,
А. И. Гнездилова, 2026



Аннотация.

При проектировании новых видов молочных консервов, основное внимание исследователей направлено на эмпирическую разработку рецептов без глубокого анализа механизмов межмолекулярного взаимодействия сахарозаменителя с мицеллами казеина. Как следствие, отсутствует глубокое понимание процессов структурирования. В работе исследовалась структура концентрированного молочного продукта с сахаром и низкокалорийным сахарозаменителем – аллюлозой. Электронно-микроскопические и реологические исследования структуры разрабатываемого концентрированного молочного продукта позволили расширить информацию о его структурно-механических свойствах.

Объектами исследования послужили образцы концентрированного молочного продукта с сахаром и аллюлозой (с 40 и 60 % заменой сахарозы на аллюлозу), свежеработанные и после хранения в течение 14 месяцев. Проведены электронно-микроскопические и реологические исследования структуры, а также определены физико-химические и органолептические показатели качества продукта. В работе применялись стандартные методы.

Электронно-микроскопические исследования морфометрических признаков структур, образуемых мицеллами казеина в продукте, показали, что замена 40 % сахарозы на аллюлозу не оказывала заметного влияния на морфометрические признаки структур. Замена 60 % сахарозы на аллюлозу приводила к деструкции мицелл казеина, образованию вокруг них сахаридной капсулы и формированию плотных агрегатов, что сказывалось на органолептических и физико-химических показателях качества. Наблюдалась излишняя текучесть продукта, обусловленная снижением вязкости на 27 %.

На основании проведенных исследований можно сделать вывод, что в разработанном концентрированном молочном продукте доля замены сахарозы на аллюлозу не должна превышать 40 %.

Ключевые слова. Молочный продукт, аллюлоза, сахароза, казеин, качество, хранение

Финансирование. Работа выполнена на базе ФГБОУ ВО «Вологодская государственная молочнохозяйственная академия имени Н. В. Верещагина», в т. ч. на базовой кафедре, находящейся во Всероссийском научно-исследовательском институте маслоделия и сыроделия – филиале ФГБНУ «ФНЦ пищевых систем им. В. М. Горбатова».

Для цитирования: Куренков С. А., Куренкова Л. А., Смыков И. Т., Гнездилова А. И. Электронно-микроскопические и реологические исследования структуры концентрированного молочного продукта с сахаром и сахарозаменителем. Техника и технология пищевых производств. 2026. Т. 56. № 1. С. 72–85. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-1-2623>

Sugar vs. Sugar Substitutes in Condensed Dairy Products: Electron Microscopy and Rheology



Sergey S. Kurenkov^{1,*}, Lyudmila A. Kurenkova¹,
Igor T. Smykov², Anna I. Gnezdilova¹

¹ Vologda State Dairy Farming Academy named after N.V. Vereshchagin^{ROR}, Vologda, Russia

² All-Russian Scientific Research Institute of Butter and Cheese Making^{ROR}, Uglich, Russia

Received: 22.10.2025

Revised: 19.12.2025

Accepted: 13.01.2026

*e-mail: kurenkovser.35@yandex.ru

© S.S. Kurenkov, L.A. Kurenkova, I.T. Smykov, A.I. Gnezdilova, 2026



Abstract.

Publications on functional condensed dairy foods focus on the formulation without considering the intermolecular interaction between a particular sweetener and casein micelles. Consequently, the structuring processes remain largely understudied. Electron microscopy and rheological studies may provide important data about the structure and mechanics of this interaction. This article introduces a comparative structural analysis of a condensed dairy product with sugar and its low-calorie substitute allulose.

The research included fresh and 14-month-old original product with sugar and its experimental samples where sucrose was substituted with 40 and 60% allulose. The structural analysis involved the methods of electron microscopy and rheology. The physicochemical parameters and sensory profile were studied using standard methods.

The electron-microscopic studies of the structures formed by casein micelles showed that 40% allulose had no effect on their morphometry. However, replacing 60% sucrose with allulose destroyed casein micelles, encapsulating them with saccharide and forming dense aggregates, which spoiled the sensory and physicochemical quality of the final product. The excessive fluidity of the product was due to a 27% decrease in viscosity. In this study, replacing more than 40% of conventional sweetener with allulose damaged the quality of the functional condensed dairy product.

Keywords. Dairy products, allulose, sucrose, casein, quality, storage

Funding. The research was conducted on the premises of the Vologda State Dairy Farming Academy named after N.V. Vereshchagin and its department located at the All-Russian Scientific Research Institute of Butter and Cheese Making – Branch of V.M. Gorbатов Federal Research Center for Food Systems of RAS.

For citation: Kurenkov SS, Kurenkova LA, Smykov IT, Gnezdilova AI. Sugar vs. Sugar Substitutes in Condensed Dairy Products: Electron Microscopy and Rheology. Food Processing: Techniques and Technology. 2026;56(1):72–85. (In Russ.) <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-1-2623>

Введение

В условиях глобальной эпидемии ожирения и сахарного диабета проблема сокращения потребления добавленных сахаров приобретает первостепенное значение. Несмотря на это, продукты с высоким содержанием сахарозы, например сгущенное молоко с сахаром (содержание сахарозы – 43,5 %), остаются популярными у потребителя в силу сложившихся вкусовых предпочтений. Данное противоречие обуславливает необходимость поиска научно обоснованных подходов к снижению калорийности традиционных продуктов питания, в частности за счет применения сахарозаменителей, способных имитировать сенсорные и технологические свойства сахарозы.

С целью снижения калорийности традиционного сгущенного молока с сахаром предложено заменить в его составе часть сахарозы на аллюлозу (патент РФ № 2807725 С1).

Аллюлоза (D-психоза) – редкий моносахарид (изомер фруктозы), который обладает сладким вкусом (~ 70 % сладости сахарозы), но почти не содержит калорий (~ 0,2–0,4 ккал/г) и не повышает уровень глюкозы в крови (гликемический индекс ≈ 1). Аллюлоза является эффективной низкокалорийной заменой сахара и поэтому пригодна для получения продуктов с пониженной энергетической ценностью. Аллюлоза не влияет на уровень инсулина, что обеспечивает безопасность питания для диабетиков. Ее высокие антиоксидантные и антигликационные свойства способствуют замедлению образования некоторых опасных соединений (например акриламида) [1–7].

Аллюлоза обладает высокими технологическими свойствами: стабилизирует текстуру и влагоудерживающую способность продуктов, участвует в реакциях Майяра (придает золотистую корочку выпечке), снижает точку замерзания и взаимодействует с казеином,

предотвращая избыточную агрегацию белков. Исследования по термостабильности и технологическим свойствам показали, что аллюлоза не разлагается при пастеризации (72–85 °C) и стерилизации (121 °C). В то же время использование аллюлозы имеет свои ограничения и проблемы: широкое применение в пищевой промышленности сдерживается сложностью и высокой себестоимостью производственного процесса. Основным методом получения аллюлозы – ферментативная биоконверсия субстратов, богатых фруктозой, прежде всего фруктозы и инулина [8–13].

Ключевым технологическим вызовом является низкий выход целевого продукта. Процесс эпимеризации D-фруктозы в D-психозу катализируется ферментом D-тагатозо-3-эпимеразой (D-TE), который отличается невысокой стабильностью и специфичностью [12–14]. Выход аллюлозы в большинстве промышленных процессов не превышает 30–35 % от массы исходного субстрата, что напрямую влияет на ее высокую рыночную стоимость. Дополнительные расходы связаны с этапами очистки и выделения аллюлозы из реакционной смеси. Эти этапы требуют использования дорогостоящих методов хроматографии для отделения целевого продукта от непрореагировавшей фруктозы и других моносахаридов [14–18].

Географически промышленный синтез аллюлозы в настоящее время сосредоточен в нескольких странах, обладающих развитыми биотехнологиями: Республика Корея, Япония, США и Китай. Китай активно развивает собственные биотехнологические производства. Ряд китайских компаний освоили промышленный выпуск аллюлозы, что способствует постепенному снижению ее стоимости.

Таким образом, хотя технологические барьеры делают процесс получения аллюлозы сложным и затратным, ее производство уже вышло за рамки лабораторных исследований и реализовано в промышленных масштабах в ряде технологически развитых стран. Это позволяет говорить о формировании глобальной рыночной цепочки. Кроме того, аллюлоза уже нашла применение в пищевой промышленности [19–23].

С учетом способа внесения сахарозы в виде сиропа в традиционную технологию производства сгущенного молока с сахаром исследованы свойства водных растворов аллюлозы [24, 25].

Предварительно установлено, что аллюлозу целесообразно применять в качестве альтернативы сахарозе в технологии консервированных молочных продуктов с сахаром. В ходе анализа уровня техники не было обнаружено данных об исследовании аллюлозы в этом направлении, что подтверждает актуальность работы. Возможность использования нового вещества в рецептуре продукта оценивается по совокупности органолептических, физико-химических и микробиологических показателей. Однако для сгущенных молочных продуктов с сахаром особую роль играет рассмотрение структурных свойств как с точки зрения реологии,

так и с точки зрения формирования микроструктуры. Анализ доступных информационных источников показывает, что основное внимание исследователей и производителей направлено на эмпирическую разработку рецептур продуктов без учета характера взаимодействия новых компонентов с мицеллами казеина. Как следствие, отсутствует глубокое понимание процессов структурирования в таких продуктах и структурных изменений в процессе длительного хранения. Совокупное проведение электронно-микроскопического и реологического анализа, положенное в основу моделирования технологических процессов, позволит целенаправленно регулировать структурно-механические характеристики конечного продукта, обеспечивая его стабильно высокое качество.

Цель исследования – комплексно изучить механизмы взаимодействия мицеллярных структур казеина с сахарозой и аллюлозой в концентрированном молочном продукте (КМП) и оценить влияние замены сахарозы на аллюлозу на стабильность продукта в процессе длительного хранения.

Задачами работы являлись:

- проведение сравнительного электронно-микроскопического анализа для установления влияния типа подсластителя (сахароза / аллюлоза) и его концентрации на морфогенез казеиновых структур;
- выявление возможных расхождений между формой и размерами структурных элементов в образцах с различными концентрациями аллюлозы;
- установление возможных различий между формой и размерами структурных элементов в образцах концентрированного молочного продукта с сахаром и аллюлозой в процессе длительного хранения продукта;
- исследование реологического поведения и определение реологических параметров (вязкости, предельного динамического напряжения сдвига) разрабатываемых образцов концентрированных молочных продуктов;
- исследование комплекса физико-химических и органолептических характеристик КМП с сахарозаменителем сахароза+аллюлоза с целью установления корреляционных связей между параметрами качества и сенсорным восприятием готового продукта.

Объекты и методы исследования

В качестве объектов исследования послужили образцы концентрированного молочного продукта, рецептура которых предусматривала различное соотношение сахарозы и ее заменителя – аллюлозы. При выборе доли замены сахарозы на аллюлозу в рамках предварительных исследований рассмотрен диапазон от 0 до 100 %: 30, 40, 50, 60 и 100 %. Основными критериями при выборе доли замены были максимальная близость органолептических, физико-химических и микробиологических показателей полученных образцов к традиционному продукту, выработанному в соответствии ГОСТ, и максимальное сокращение его калорийности.

На основании полученных результатов органолептической оценки установлено, что наибольшая степень сенсорной близости к контрольному образцу характерна для образцов с долей замещения сахарозы аллюлозой 30 и 40 %. При этом образец с 30 % замещением не показал значимых отличий от контроля. В образце с содержанием аллюлозы 50 % выявлен слабо выраженный атипичный привкус, а также наблюдался кремовый оттенок. Несмотря на выявленные отклонения, сенсоральное восприятие данного образца не было охарактеризовано как негативное. Указанный образец обладал приемлемыми органолептическими свойствами, однако его сенсорный профиль не позволял провести прямую идентификацию с традиционным сгущенным молоком с сахаром.

Последующее увеличение концентрации аллюлозы приводило к появлению слабого горьковатого привкуса (при 60 % замещении), интенсивность которого коррелировала с ростом доли аллюлозы, достигая отчетливого горького вкуса при полной (100 %) замене сахарозы.

Образцы характеризовались однородной окраской по всей массе. Однако, начиная с уровня замещения 50 %, наблюдалась прогрессирующая динамика изменения цвета от кремового (50 %) до светло-коричневого (100 %), что, вероятно, связано с реакцией меланоидинообразования. Таким образом, с учетом результатов предварительной оценки органолептических свойств образцов для дальнейших исследований выбраны образцы, содержащие 40 и 60 % аллюлозы. Образец с заменой 40 % сахарозы на аллюлозу выбран как наиболее соответствующий предварительной цели исследования, а образец с заменой 60 % использован для изучения механизма изменений, происходящих при увеличении доли замены сахарозы на аллюлозу.

Состав и идентификация опытных образцов представлены в таблице 1.

Для приготовления опытных образцов использовано сырье, соответствующее требованиям действующих стандартов: сухое обезжиренное молоко (ГОСТ Р 52791-2007), питьевая вода высшей категории (ГОСТ Р 51232-98), молочный жир (ГОСТ 33632-2015), сахар-песок (ГОСТ 33222-2015) и аллюлоза (по документации производителя).

Методика приготовления опытных образцов включала несколько последовательных технологических стадий. На первом этапе проводили восстановление сухого обезжиренного молока в питьевой воде, нагретой до 40–50 °С, с последующей фильтрацией для удаления возможных нерастворимых включений. Далее в восстановленную молочную основу вносили расчетные количества сахарозы и аллюлозы согласно рецептурам (табл. 1) и перемешивали до достижения гомогенной структуры и полной гидратации компонентов. После этого подготовленную смесь подвергали мгновенной пастеризации в режиме 93–97 °С без выдержки.

На заключительном этапе пастеризованный продукт охлаждали до температуры массовой кристаллизации (31–37 °С) молочного сахара, после чего вносили затравку в количестве 0,02 % от массы смеси, в качестве которой использовали мелкокристаллическую β -лактозу. Процесс кристаллизации завершали постепенным охлаждением продукта до финальной температуры 20 °С.

Сравнительному анализу подвергли шесть образцов, разделенных на две группы: три свежеприготовленных и три после 14-месячного хранения. Проведен комплекс исследований – электронно-микроскопических, физико-химических, реологических, а также органолептических. Условные обозначения образцов в зависимости от доли замены сахарозы на аллюлозу показаны в таблице 2.

Характеристика физико-химических свойств разработанного продукта выполнена с применением комплекса стандартизированных и инструментальных методик.

Массовую долю сухих веществ определяли рефрактометрическим методом на рефрактометре RL-3

Таблица 1. Компонентный состав концентрированного молочного продукта при различной степени замещения сахарозы аллюлозой, кг/100 кг

Table 1. Composition of condensed dairy samples with different shares of allulose, kg/100 kg

Компонент	Доля замены сахарозы на аллюлозу, %		
	0	40	60
Сухое обезжиренное молоко	230,0	230,0	230,0
Жир молочный	86,7	86,7	86,7
Сахар	435,0	261,0	174,0
Вода	248,1	248,1	248,1
Аллюлоза	–	174,0	261,0
Лактоза	0,2	0,2	0,2
ИТОГО	1000,0	1000,0	1000,0

Таблица 2. Условные обозначения образцов концентрированного молочного продукта

Table 2. Conventional designations for different samples of condensed dairy product

Доля замены сахарозы на сахарозаменитель (аллюлозу), %	Свежевыработанные, обозначение	После хранения 14 месяцев, обозначение
0 (контроль)	К_0	К_1
40	40_0	40_1
60	60_0	60_1

(PZO, Польша) согласно ГОСТ 31774-2012. Средний линейный размер кристаллов измеряли с помощью микроскопа OLYMPUS CX31 при увеличении в 500 раз в комплекте с цифровой камерой TourCam U3CMO S18000KPA и программным обеспечением TourView (Olympus, Япония). Оценку гранулометрического состава осуществляли из выборки 100 кристаллов (ГОСТ 29245-91). Вязкость устанавливали с использованием вискозиметра Гепплера с падающим шариком (ГОСТ 27709-2015). Активную кислотность определяли потенциометрическим методом (ГОСТ 32892-2014), активность воды – на анализаторе HygroPalm (HP23-Aw, Rotronic, Япония). Оценка органолептических показателей осуществлялась по ГОСТ 28283-2015. Микробиологическую безопасность определяли согласно ГОСТ 10444.12-2013 и ГОСТ 32901-2014.

Опыты проводили в трехкратной повторности. Математическую обработку результатов осуществляли с помощью пакета прикладных программ Microsoft Office 2021.

Исследование ультратонкой структуры образцов выполняли на электронном микроскопе EM-410 (Philips, Нидерланды). Ключевым этапом пробоподготовки была процедура контрастирования солями тяжелых металлов, которая обеспечивала селективное осаждение электронно-плотного материала на поверхностях биополимеров.

Пробоподготовка образцов для электронно-микроскопического анализа проводилась в соответствии со стандартизированным протоколом. На первом этапе исходный образец концентрированного молочного продукта (независимо от наличия или отсутствия в его рецептуре аллюлозы) подвергали разведению в дистиллированной воде в массовом соотношении 1:100 с целью получения стабильной коллоидной системы, обеспечивающей последующее получение репрезентативных электронных микрофотографий без артефактов агрегации.

Полученную суспензию наносили капельным методом на медные сетки Mesh-400, предварительно покрытые специальной пленкой. Для стабилизации ультратонкой структуры проводили химическую фиксацию глутаровым альдегидом в течение 30 мин. Далее выполняли контрастирование 2 % водным раствором уранил-ацетата с последующей отмывкой дистиллятом для удаления избытка реактива. После полного высушивания при комнатной температуре подготовленные препараты размещали в держателе микроскопа.

Электронно-микроскопическое исследование проводили в стандартном режиме работы прибора: ускоряющее напряжение 80 кВ, ток электронного пучка 12 мкА. Визуализацию осуществляли при стандартном увеличении $\times 14000$ и $\times 46000$, что обеспечивало необходимое разрешение для идентификации структурных элементов мицеллярного комплекса.

Определение реологических характеристик опытных образцов проводили на ротационном вискози-

метре Реотест 2 (Rheotest Medingen GmbH, Германия). Использовали принцип работы прибора, основанный на регистрации крутящего момента при заданной постоянной скорости вращения рабочего органа. Измерения осуществляли при строго контролируемой температуре $20,0 \pm 0,5$ °C, поддерживаемой системой термостатирования с жидкостным контуром. Применяли цилиндрическую измерительную систему S-S2, обеспечивающую ламинарный режим сдвига в исследуемом материале. Для получения полной реологической характеристики задавали ступенчатый режим изменения скорости сдвига в диапазоне $0,1\text{--}100,0$ с⁻¹. Установившееся значение напряжения сдвига регистрировали при каждой скорости.

Методика измерений основывалась на регистрации напряжения сдвига, возникающего в исследуемом материале при деформации. Для проведения эксперимента отбирали навеску продукта массой 30,0 г и помещали в стандартный измерительный цилиндр. При установке цилиндра на ротор обеспечивали точную соосность геометрии измерительной системы и равномерное распределение образца в рабочем зазоре для исключения краевых эффектов.

Экспериментальные исследования проводили при десяти последовательно возрастающих градациях крутящего момента. Показания снимали с логометрического индикатора после установления стабильного значения сигнала на каждой ступени нагружения. Между измерениями выдерживали временной интервал 60 с для релаксации механических напряжений в образце.

Для получения воспроизводимых результатов каждое измерение проводили в трехкратной повторности. Полученные данные фиксировали в протоколе исследования с указанием температуры и влажности окружающей среды. Рассчитывали средние арифметические значения и стандартное отклонение для каждой точки измерения.

Напряжение сдвига определяли по формуле (1):

$$\tau = z \times \alpha \quad (1)$$

где τ – напряжение сдвига, Па; z – константа ротора, 10^{-1} /деление шкалы; α – отсчитываемое значение шкалы на индикаторном приборе (логометре), деление шкалы.

Эффективную вязкость, мПа·с, определяли по формуле (2):

$$\eta = \frac{\tau}{\gamma} \times 100 \quad (2)$$

где γ – скорость сдвига, с⁻¹.

Определение реологических свойств концентрированных молочных продуктов с комбинированным подсластителем (сахароза+аллюлоза) проводили с использованием специализированной дифференциальной измерительно-информационной системы (ИИС). Конструктивное исполнение установки предусматривает

возможность параллельных исследований в двух ячейках с синхронным контролем комплекса параметров.

Рабочую ячейку и ячейку сравнения оснащали высокоточными сенсорами для мониторинга температуры и модуля упругости в реальном времени. Интегрированные в систему датчики реологических характеристик предварительно калибровали на реогониометре Вайссенберга, обеспечивая метрологическую прослеживаемость измерений динамической вязкости.

В качестве стандартного вещества для калибровочных процедур и дифференциальных исследований использовали глицерин марки «ЧДА», соответствующий требованиям ГОСТ 6259-75. Перед началом измерений проводили валидацию методики с использованием стандартных образцов контрольных сред. Установку подготавливали к работе согласно регламенту, включающему прогрев системы, проверку нулевых показаний и тестовые измерения на эталонных жидкостях.

Для каждого опытного образца выполняли серию из 5–7 последовательных измерений с варьированием скорости деформации в диапазоне 0,1–100,0 с⁻¹. Полученные данные статистически обрабатывали с определением средних значений и доверительных интервалов при уровне значимости $p \leq 0,05$.

Результаты и их обсуждение

В рамках экспериментальной программы проведен сравнительный электронно-микроскопический анализ трансформации микроструктуры концентрированных молочных систем с комбинированным подсластителем. Исследование включало комплексную оценку морфометрических параметров мицеллярных образований казеина, пространственной организации белково-углеводного комплекса и выявление специфических структурных паттернов, формирующихся при введении аллюлозы в рецептурную композицию.

Особое внимание уделено динамике структурных перестроек в процессе длительного хранения про-

дукта и идентификации признаков синергетического взаимодействия молочных компонентов с сахарозо-аллюлозной смесью.

На рисунке 1 представлены результаты электронно-микроскопического исследования ультраструктуры концентрированного молочного продукта (КМП) с сахарозой, выполненные при стандартном увеличении $\times 14000$. Выбор данного диапазона увеличения обусловлен возможностью одновременной визуализации как макромолекулярной организации белково-углеводного комплекса, так и тонких структурных взаимодействий на межмолекулярном уровне.

На микрофотографиях (рис. 1а, 2а) демонстрируется нативная структура свежеприготовленных образцов, характеризующаяся равномерным распределением казеиновых мицелл в межкристаллическом пространстве. На рисунках 1б, 2б представлены результаты мониторинга трансформации микроструктуры после 14 месяцев хранения, отражающие динамику реорганизации белково-углеводного комплекса.

На рисунке 2 показаны электронные микрофотографии ультратонких срезов образцов контрольного КМП с сахарозой, полученные при стандартном увеличении $\times 46000$. Данный уровень разрешения позволяет визуализировать морфологию и пространственную организацию казеиновых мицелл, составляющих основу белковой матрицы продукта.

В свежеработанном образце концентрированного молочного продукта наблюдалось большое количество зародышей кристаллизации (нуклеусов) лактозы. Однако после длительного хранения экспериментального продукта нуклеусы практически не наблюдались, что противоречит общепринятым представлениям о динамике кристаллизации в молочных консервах. Состояние мицелл казеина в исследуемых образцах претерпело определенные изменения. Если в свежеработанном образце мицеллы преимущественно дистанцированы, то после хранения мицеллы образуют достаточно плотные агрегаты.

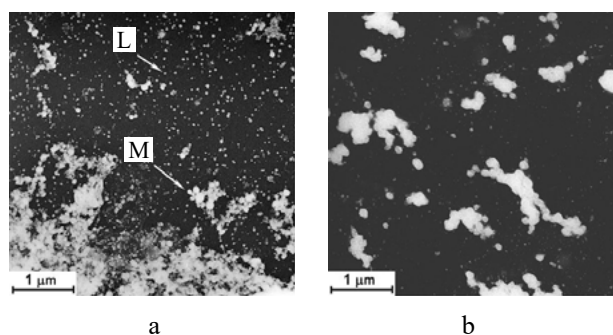


Рисунок 1. Мицеллы казеина (М) и нуклеусы лактозы (L) в концентрированном молочном продукте с сахаром: а – K_0; б – K_1 (при увеличении $\times 14000$)

Figure 1. Casein micelles (M) and lactose nuclei (L) in condensed dairy samples with sugar: а – K_0; б – K_1, low magnification

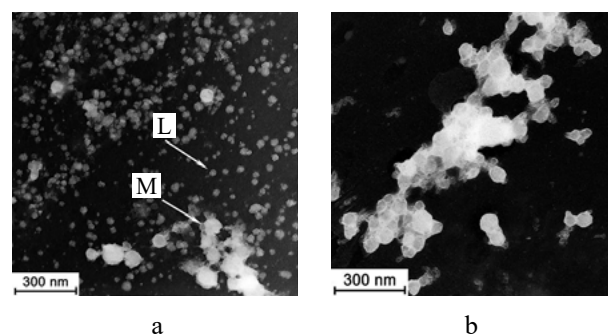


Рисунок 2. Мицеллы казеина (М) и нуклеусы лактозы (L) в концентрированном молочном продукте с сахаром: а – K_0; б – K_1 (при увеличении $\times 46000$)

Figure 2. Casein micelles (M) and lactose nuclei (L) in condensed dairy samples with sugar: а – K_0; б – K_1, high magnification

На фотографии зародышей кристаллизации лактозы, полученной при большом увеличении (рис. 3), видно, что зародыш состоит из еще более мелких нуклеусов.

На рисунках 4 и 5 приведены фотографии образцов концентрированного молочного продукта с сахаром с 40 % заменой сахарозы на аллюлозу до и после длительного хранения, полученные при различных увеличениях. При сравнении полученных изображений с фотографиями образцов без аллюлозы изменения

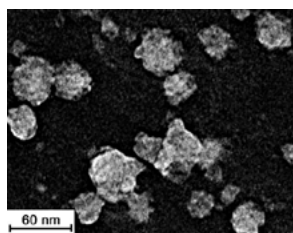


Рисунок 3. Нуклеусы лактозы в образце К_0 (при увеличении $\times 46000$)

Figure 3. Lactose nuclei in sample K_0, high magnification

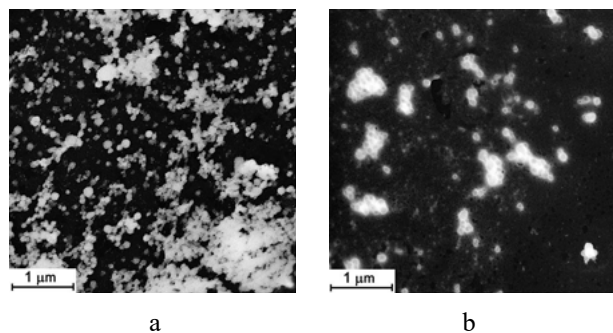


Рисунок 4. Мицеллы казеина в концентрированном молочном продукте с сахаром: а – 40_0; б – 40_1 (при увеличении $\times 14000$)

Figure 4. Casein micelles in condensed dairy samples with sugar: а – 40_0; б – 40_1, low magnification

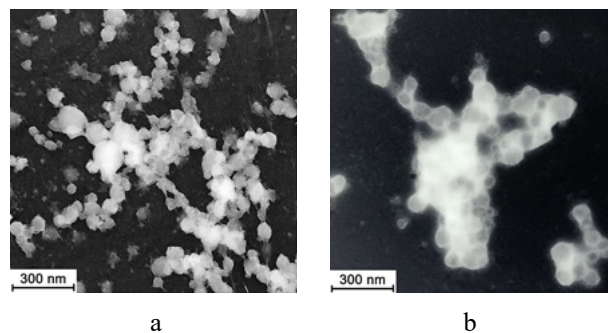


Рисунок 5. Мицеллы казеина в концентрированном молочном продукте с сахаром: а – 40_0; б – 40_1 (при увеличении $\times 46000$)

Figure 5. Casein micelles in condensed dairy samples with sugar: а – 40_0; б – 40_1, high magnification

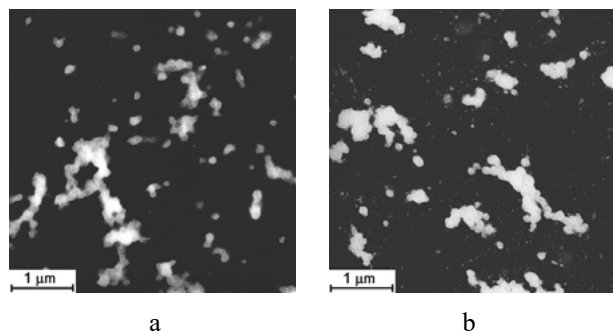


Рисунок 6. Мицеллы казеина в концентрированном молочном продукте с сахаром: а – 60_0; б – 60_1 (при увеличении $\times 14000$)

Figure 6. Casein micelles in condensed dairy samples with sugar: а – 60_0; б – 60_1, low magnification

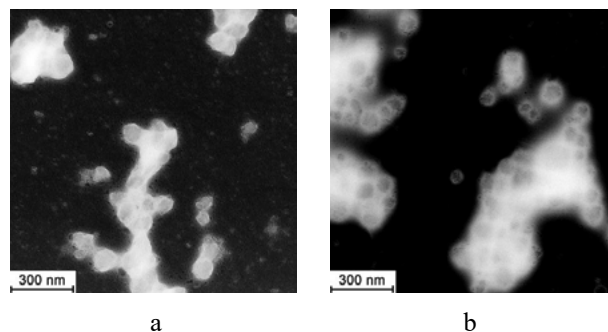


Рисунок 7. Мицеллы казеина в концентрированном молочном продукте с сахаром: а – 60_0; б – 60_1 (при увеличении $\times 46000$)

Figure 7. Casein micelles in condensed dairy samples with sugar: а – 60_0; б – 60_1, high magnification

в микроструктуре как свежесыворотанного образца, так и длительно хранившегося незначительны. В этом случае также наблюдается исчезновение нуклеусов лактозы после хранения и образование агрегатов мицелл.

На рисунках 6 и 7 представлены микрофотографии образцов КМП с 60 % заменой сахарозы на аллюлозу, демонстрирующие структурные трансформации до и после продолжительного хранения при различных увеличениях. Проведенный анализ выявил существенные структурные отклонения в сравнении с контрольными образцами без аллюлозы и вариантами с 40 % заменой сахарозы на аллюлозу.

В свежеприготовленном образце наблюдалось значительное сокращение количества центров кристаллизации лактозы, а также выраженная склонность казеиновых мицелл к образованию мелкодисперсных агрегатов. В процессе длительного хранения данные процессы усиливались: происходило укрупнение и уплотнение мицеллярных агрегатов с формированием вокруг них выраженной сахаридной капсулы.

Таким образом, введение повышенных доз аллюлозы (60 % замена) индуцирует дестабилизацию казеи-

новых мицелл, что проявляется в виде глубоких структурных изменений при длительном хранении. Наблюдаемая трансформация структуры объясняет ухудшение реологических и органолептических характеристик готового продукта при превышении оптимального уровня замены сахарозы.

На рисунке 8 приведены изображения мицелл казеина в свежеработанном образце и образце после длительного хранения. В свежеработанном образце мицелла имела хорошо выраженную форму, близкую к сферической, тогда как после хранения вокруг мицеллы образовывалась сахаридная капсула, сама мицелла разрушалась, теряла свои нативные свойства и, по-видимому, взаимодействовала с капсулой.

Результаты электронно-микроскопических исследований подтверждаются комплексом физико-химических и органолептических характеристик качества концентрированного молочного продукта с комбинированным сахарозаменителем (сахароза + аллюлоза) (табл. 3).

Установлена корреляционная зависимость между степенью структурных преобразований, выявленных

при микроскопировании, и изменением ключевых показателей качества. В частности, образцы с выраженной деструкцией белка и образованием плотных агрегатов демонстрировали статистически значимое отклонение по вязкости, активной кислотности и сенсорным характеристикам.

Проведенный корреляционный анализ показал, что структурные изменения, индуцированные введением аллюлозы, определяли сохранность потребительских свойств продукта в процессе хранения. Нарушение пространственной организации мицеллярного комплекса казеина при превышении 40 % порога замены сахарозы напрямую коррелировало с ухудшением таких органолептических параметров, как консистенция, однородность и вкусовой профиль.

В течение всего срока хранения физико-химические параметры концентрированных молочных систем с комбинированным подсластителем сохраняли соответствие установленным нормативным требованиям. Проведенный мониторинг основных показателей подтвердил стабильность продукта в рамках, регламентированных ГОСТ 31688-2012.

В процессе хранения образцов концентрированного молочного продукта массовая доля сухих веществ не изменялась. Нарастание вязкости как контрольного, так и рабочих образцов происходило практически с одинаковой интенсивностью.

В ходе экспериментальных исследований установлено, что свежеработанные образцы с частичной заменой сахарозы на аллюлозу имели практически одинаковую вязкость по сравнению с контролем. Тем не менее по завершении 14-месячного периода хранения в рабочих образцах наблюдалось снижение вязкости. Наиболее выраженное уменьшение вязкости наблюдалось в образце с 60 % заменой сахарозы на аллюлозу – его показатели заметно уступали контрольному образцу, не содержащему аллюлозу.

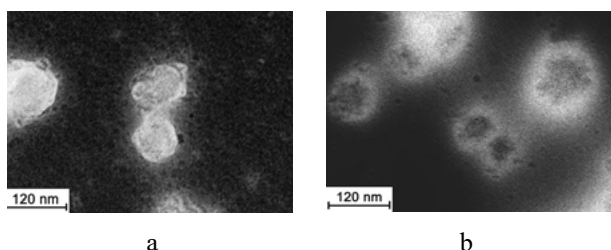


Рисунок 8. Мицеллы казеина в концентрированном молочном продукте с сахаром: а – 60_0; б – 60_1 (при увеличении $\times 46000$)

Figure 8. Casein micelles in condensed dairy samples with sugar: a – 60_0; b – 60_1, high magnification

Таблица 3. Физико-химические показатели образцов концентрированного молочного продукта 8,5 % жирности с частичной заменой сахарозы на аллюлозу в процессе хранения

Table 3. Condensed dairy product (8.5% fat) with partial replacement of sucrose with allulose: Physicochemical properties during storage

Показатель	Доля замены сахарозы на аллюлозу, %		
	0 (контроль)	40	60
Свежеработанные			
Массовая доля сухих веществ, %	74,0 $\pm$ 0,1	74,0 $\pm$ 0,1	74,0 $\pm$ 0,1
Средний линейный размер кристаллов лактозы, мкм	2,65 $\pm$ 0,05	2,58 $\pm$ 0,05	2,48 $\pm$ 0,05
pH	6,31 $\pm$ 0,05	6,42 $\pm$ 0,05	6,35 $\pm$ 0,05
Вязкость, Па·с	3,04 $\pm$ 0,02	3,03 $\pm$ 0,02	3,01 $\pm$ 0,02
Активность воды, a_w	0,813 $\pm$ 0,005	0,765 $\pm$ 0,005	0,749 $\pm$ 0,005
После 14 месяцев хранения			
Массовая доля сухих веществ, %	74,0 $\pm$ 0,1	74,0 $\pm$ 0,1	74,0 $\pm$ 0,1
Средний линейный размер кристаллов лактозы, мкм	5,06 $\pm$ 0,08	4,64 $\pm$ 0,08	4,34 $\pm$ 0,08
pH	6,62 $\pm$ 0,05	6,44 $\pm$ 0,05	6,41 $\pm$ 0,05
Вязкость, Па·с	5,37 $\pm$ 0,03	4,39 $\pm$ 0,03	4,06 $\pm$ 0,03
Активность воды, a_w	0,849 $\pm$ 0,005	0,798 $\pm$ 0,005	0,790 $\pm$ 0,005

Данные электронно-микроскопических исследований подтвердили существенные трансформации микроструктуры образца с 60 % заменой. При сравнении с двумя контрольными группами – образцами без аллюлозы и образцами с 40 % заменой сахарозы – выявлены отчетливые морфологические различия. Эти структурные изменения, скорее всего, обуславливают снижение вязкости в долгосрочном периоде хранения.

Визуальные подтверждения структурных преобразований представлены на микрофотографиях (рис. 6 и 7), где наглядно прослеживаются:

- изменение характера распределения компонентов в матрице продукта;
- отличия в размере и форме структурных элементов;
- особенности межфазных границ в образцах с различной степенью замены сахарозы.

В свежеработанных образцах показатель вязкости практически не отличался от контроля. Кроме того, следует отметить положительное влияние аллюлозы на активность воды в продукте, а также на замедление скорости роста кристаллов лактозы при хранении и отсутствие влияния на pH среды. Полученные данные подтверждаются результатами сенсорной оценки (табл. 4).

Наличие горьковатого привкуса в образце с заменой сахарозы на аллюлозу является ограничивающим фактором для последующего увеличения массовой доли аллюлозы в составе продукта.

Одним из критических факторов, лимитирующих сохранение качества концентрированных молочных продуктов в процессе хранения, выступает развитие резистентной микрофлоры. Несмотря на то что создание высокого осмотического давления в данной продукции обеспечивает ингибирование жизнедеятельности большинства микроорганизмов, отдельные их представители проявляют толерантность к таким условиям. Среди них особую значимость представляют осмоотолерантные дрожжи и ксерофильные плесневые грибы, способные развиваться в средах с пониженной водной активностью.

Особую группу риска составляют протеолитические микроорганизмы, метаболическая активность которых инициирует процессы гидролитического расщепления липидов с последующим образованием низкомолекулярных жирных кислот. Данные биохимические трансформации обуславливают развитие органолептических дефектов, в частности прогоркания продукта, что существенно снижает его потребительские свойства при длительном хранении.

Систематизированы результаты мониторинга ключевых микробиологических параметров, характеризующих санитарно-гигиеническое состояние опытных образцов в процессе хранения (табл. 5). Данные включают динамику в процессе хранения основных групп микроорганизмов, представляющих потенциальную опасность для стабильности молочных консервов.

Полученные результаты позволяют провести комплексную оценку микробиологической стабильности разработанных рецептур в сравнении с нормативными требованиями. Особое внимание уделено выявлению корреляционных зависимостей между степенью замены сахарозы на аллюлозу и динамикой развития специфической микрофлоры, что имеет принципиальное значение для прогнозирования сроков годности модифицированных продуктов.

Проведенные исследования демонстрируют хорошие показатели микробиологической безопасности всех опытных образцов в течение установленного срока хранения, что подтверждает технологическую состоятельность разработанных рецептур и соответствие готовой продукции действующим санитарно-гигиеническим нормативам.

В рамках комплексного анализа потребительских свойств разработанных продуктов выполнен расчет их пищевой и энергетической ценности (табл. 6). Объектами исследования послужили опытные образцы, в которых сахароза частично замещалась аллюлозой – в двух вариантах дозировки: 40 и 60 % от исходного содержания сахара. Для корректной интерпретации результатов параллельно проведен аналогичный расчет для контрольного образца, не содержащего аллюлозу.

Таблица 4. Результаты комплексной органолептической оценки концентрированных молочных продуктов с вариативным содержанием сахарозы и аллюлозы

Table 4. Comprehensive sensory evaluation of condensed dairy samples with variable sucrose and allulose

Показатель	Доля замены сахарозы на аллюлозу, %	
	0 (контроль)	40
Вкус и запах	Сладкий, чистый, с выраженным вкусом пастеризованного молока, без каких-либо посторонних привкусов и запахов	Сладкий, чистый, с выраженным вкусом пастеризованного молока, с горьковатым привкусом
Консистенция	Однородная по всей массе, в меру вязкая, без наличия органолептически ощутимых кристаллов лактозы	Однородная по всей массе, излишне текучая, без наличия органолептически ощутимых кристаллов лактозы
Цвет	Белый с кремовым оттенком, равномерный по всей массе	Белый с кремовым оттенком, равномерный по всей массе

Таблица 5. Результаты микробиологического мониторинга опытных образцов концентрированных молочных продуктов

Table 5. Microbiological tests of experimental samples of condensed dairy samples

Доля замены сахарозы на аллюлозу, %	Количество мезофильных аэробных и факультативно анаэробных микроорганизмов, КОЕ/см ³ (г), не более	БГКП (колиформы), масса продукта, в которой не допускаются, см ³ (г)	Протеолитические микроорганизмы, КОЕ/см ³ (г)	Дрожжи и плесени, КОЕ/см ³ (г)
Свежевыработанные образцы				
0 (контроль)	2,0×10 ⁴	1,0	–	–
40	2,0×10 ⁴	1,0	–	–
60	2,0×10 ⁴	1,0	–	–
Образцы после 14 месяцев хранения				
0 (контроль)	2,0×10 ⁴	1,0	–	–
40	2,0×10 ⁴	1,0	–	–
60	2,0×10 ⁴	1,0	–	–

Таблица 6. Расчетные показатели пищевой и энергетической ценности концентрированного молочного продукта после частичной замены сахарозы на аллюлозу (варианты 40 и 60 %)

Table 6. Nutritional and energy profiles of condensed dairy samples with 40 and 60% allulose, calculated values

Показатель	Доля замены сахарозы на аллюлозу, %		
	0 (контроль)	40	60
Белки, г	8,9	8,9	8,9
Жиры, г	8,5	8,5	8,5
Углеводы, г, в т. ч.	56,0	56,0	56,0
сахароза, г	56,0	33,6	22,4
аллюлоза, г	0	22,4	33,6
Калорийность, ккал	328,9	261,6	238,8
Энергетическая ценность, кДж	1380,1	1099,0	955,8

Включение аллюлозы в рецептуру концентрированного молочного продукта в качестве заменителя сахарозы приводит к статистически значимому снижению энергетической ценности конечного продукта. Проведенный анализ демонстрирует наличие выраженной дозозависимой корреляции между степенью замещения и уменьшением калорийности: при 40 % замене сахарозы наблюдалось снижение энергетической ценности на 20 %, тогда как при 60 % замещения – на 30 %.

Установленная закономерность обусловлена спецификой метаболизма аллюлозы, которая характеризуется пониженной энергетической ценностью по сравнению с традиционной сахарозой.

Это позволяет рекомендовать аллюлозу в качестве подсластителя для людей, страдающих диабетом, избыточным весом и ожирением. Увеличение доли замены сахарозы на аллюлозу способствует более интенсивному снижению энергетической ценности, однако приведенные выше данные по изменению микроструктуры продукта и его органолептических характеристик накладывают некоторые ограничения, и поэтому рекомендуется доля замены – не превышающая 40 %.

Результаты электронно-микроскопических исследований, а также физико-химические и органолептические показатели качества концентрированного

молочного продукта с сахаром и аллюлозой согласуются с данными по оценке реологических характеристик образцов.

Анализ реологического поведения концентрированных молочных систем требует комплексного изучения фундаментальных характеристик течения, среди которых ключевое значение имеют зависимости напряжения сдвига и эффективной вязкости от скорости деформации.

На рисунке 9 представлены реограммы течения свежеприготовленных образцов, отражающие функциональную взаимосвязь между касательным напряжением и скоростью сдвига.

Реологические характеристики свежеприготовленных образцов концентрированного молочного продукта – контрольного, с 40 и 60 % замещением сахарозы аллюлозой – демонстрировали выраженную степенную зависимость между напряжением сдвига и скоростью деформации. Полученные реологические кривые соответствуют классической модели псевдопластичного течения, характерной для структурированных дисперсных систем пищевого назначения.

Подтверждением этому служит характер аналитических зависимостей, приведенных в таблице 7, соответствующих по виду уравнению течения для псевдопластических жидкостей. Для контрольного образца

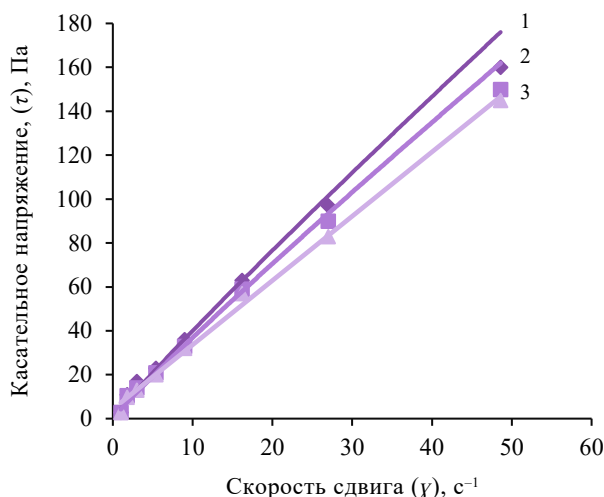


Рисунок 9. Реологические профили свежеработанных концентрированных молочных продуктов с различной долей замены сахарозы на аллюлозу: 1 – 0 % (контроль); 2 – 40 %; 3 – 60 %

Figure 9. Rheological profiles of fresh condensed dairy samples with different allulose shares: 1 – 0% (control); 2 – 40%; and 3 – 60%

Таблица 7. Уравнения зависимости касательного напряжения от скорости сдвига в свежеработанных образцах продукта с различной долей замены сахара на аллюлозу

Table 7. Effect of shear rate on shear stress in fresh condensed dairy samples with different allulose shares: Equations for dependence

Доля замены, %	Уравнение зависимости	Коэффициент детерминации
0 (контроль)	$\tau = 4,6202\gamma^{0,9373}$	$R^2 = 0,9978$
40	$\tau = 4,284\gamma^{0,9352}$	$R^2 = 0,9984$
60	$\tau = 3,9773\gamma^{0,9344}$	$R^2 = 0,9978$

показатель степени приближался к единице, и зависимость носила практически прямолинейный характер.

Через 14 месяцев хранения (рис. 10) все кривые также подчинялись представленной выше закономерности.

Анализ графических зависимостей, представленных на рисунке 10, подтверждает их адекватное математическое описание в рамках степенной реологической модели. Аппроксимация экспериментальных кривых осуществлялась с высокими значениями коэффициента корреляции, находящимися в диапазоне 0,992–0,998, что свидетельствует о статистически достоверном соответствии выбранной математической модели реальным реологическим свойствам исследуемых систем (табл. 8).

Зависимость эффективной вязкости от скорости сдвига представлены на рисунках 11–12.

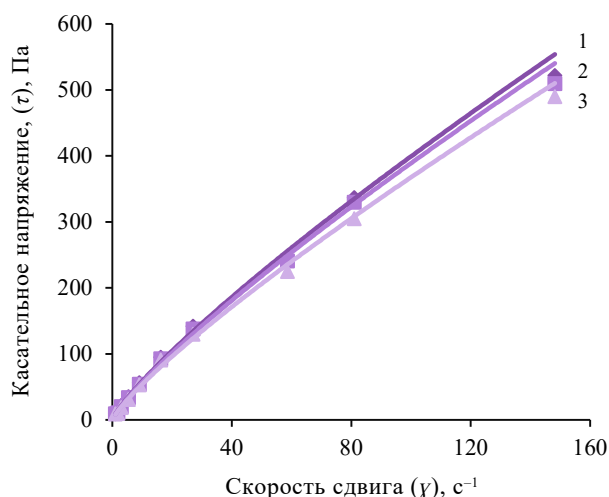


Рисунок 10. Реологические профили концентрированных молочных продуктов с различной долей замены сахарозы на аллюлозу после 14 месяцев хранения: 1 – 0 % (контроль); 2 – 40 %; 3 – 60 %

Figure 10. Rheological profiles of condensed dairy samples with different allulose shares after 14 months of storage: 1 – 0% (control); 2 – 40%; and 3 – 60%

Таблица 8. Уравнения зависимости касательного напряжения от скорости сдвига в образцах консервированного молочного продукта после 14 месяцев хранения

Table 8. Effect of shear rate on shear stress in condensed dairy samples with different allulose shares after 14 months of storage: Equations for dependence

Доля замены, %	Уравнение зависимости	Коэффициент детерминации
0 (контроль)	$\tau = 8,6193 \times \gamma \times 0,8328$	$R^2 = 0,9981$
40	$\tau = 8,2857 \times \gamma \times 0,8358$	$R^2 = 0,9979$
60	$\tau = 7,8905 \times \gamma \times 0,8341$	$R^2 = 0,9987$

Для описания зависимости эффективной вязкости от скорости сдвига было использовано степенное уравнение (3):

$$\eta_{\text{эф}} = k \times \gamma^m \quad (3)$$

где $\eta_{\text{эф}}$ – эффективная вязкость, Па·с; γ – частота деформирования, с⁻¹; k – коэффициент консистенции, значение которого соответствует величине динамической вязкости при $\gamma = 1 \text{ с}^{-1}$; m – темп разрушения структуры.

В таблицах 9 и 10 приведены аналитические зависимости. Показатель степени в реологических уравнениях, моделирующих зависимость эффективной вязкости от скорости сдвига, является ключевым индикатором структурной прочности концентрированных молочных продуктов с сахаром, в т. ч. с сахаром и аллюлозой. Его численное значение количественно отражает

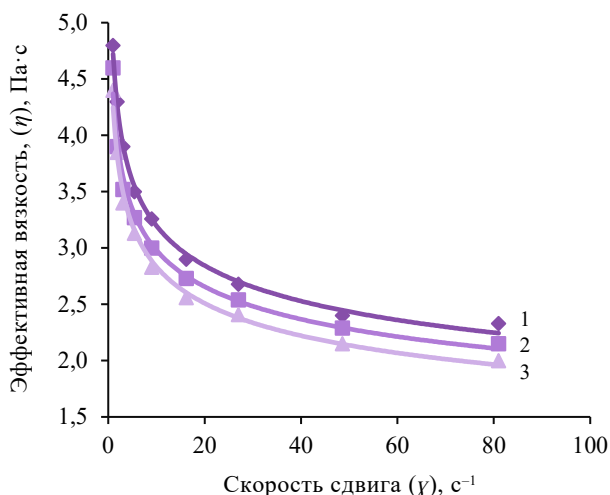


Рисунок 11. Зависимость эффективной вязкости от скорости сдвига для свежеработанных образцов с различной долей замены сахарозы на аллюлозу: 1 – 0 % (контроль); 2 – 40 %; 3 – 60 %

Figure 11. Effect of shear rate on effective viscosity in fresh condensed dairy samples with different allulose shares: 1 – 0% (control); 2 – 40%; and 3 – 60%

Таблица 9. Уравнения зависимости эффективной вязкости (η) от скорости сдвига (γ) в свежеработанных образцах консервированного молочного продукта

Table 9. Effect of shear rate (γ) on effective viscosity (η) in fresh condensed dairy samples with different allulose shares: Equations of dependence

Доля замены, %	Уравнение зависимости	Коэффициент детерминации
0 (контроль)	$\eta = 4,7218\gamma^{-0,169}$	$R^2 = 0,9965$
40	$\eta = 4,3686\gamma^{-0,166}$	$R^2 = 0,9857$
60	$\eta = 4,2468\gamma^{-0,17}$	$R^2 = 0,9923$

степень отклонения реологического поведения от ньютоновской модели, что интерпретируется как интенсивность деструкции внутренней каркасной структуры под механическим воздействием. Проведенный анализ установил четкую тенденцию: темп разрушения структуры находится в прямой зависимости от массовой доли аллюлозы в продукте. При этом реологические свойства демонстрируют выраженную временную зависимость: в свежеприготовленных образцах структурный каркас проявляет большую устойчивость к сдвиговым деформациям по сравнению с образцами после 14-месячного хранения. Наиболее значительное изменение структурной прочности отмечалось для композиций с 60 % замещением сахарозы, где разрушения структуры достигали максимума. Данный реологический вывод находится в полном соответствии с результатами электронной микроскопии.

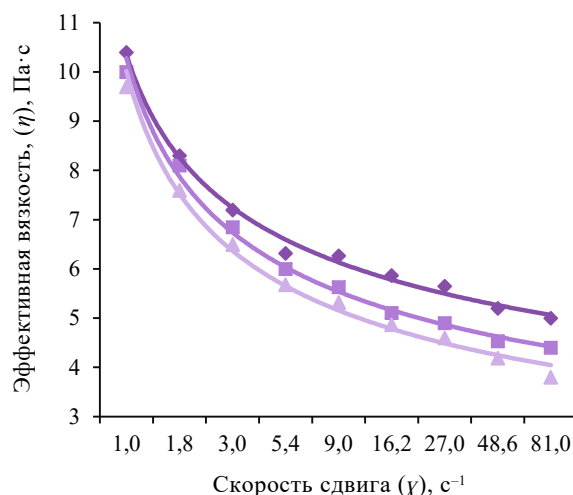


Рисунок 12. Зависимость эффективной вязкости от скорости сдвига в образцах консервированного молочного продукта с сахаром и аллюлозой после 14 месяцев хранения: 1 – 0 % (контроль); 2 – 40 %; 3 – 60 %

Figure 12. Effect of shear rate on effective viscosity in condensed dairy samples with different allulose shares after 14 months of storage: 1 – 0% (control); 2 – 40%; and 3 – 60%

Таблица 10. Уравнения зависимости эффективной вязкости (η) от скорости сдвига (γ) в образцах консервированного молочного продукта после 14 месяцев хранения

Table 10. Effect of shear rate (γ) on effective viscosity (η) in condensed dairy samples with different allulose shares after 14 months of storage: Equations of dependence

Доля замены, %	Уравнение зависимости	Коэффициент детерминации
0 (контроль)	$\eta = 10,354\gamma^{-0,325}$	$R^2 = 0,9941$
40	$\eta = 10,279\gamma^{-0,384}$	$R^2 = 0,9945$
60	$\eta = 10,019\gamma^{-0,413}$	$R^2 = 0,9927$

Выводы

Проведенное электронно-микроскопическое исследование показало, что влияние аллюлозы на морфометрические признаки структур, образуемых мицеллами казеина в концентрированном молочном продукте, носит разнонаправленный характер и напрямую зависит от процента замены ею сахарозы. Замена 40 % сахарозы не оказывала существенного влияния на структуру казеиновых мицелл как в свежеработанных, так и в хранившихся образцах, оставляя их морфологию сопоставимой с контрольным продуктом без замены. В то же время более высокая доля замены – 60 % – приводила к значительным структурным изменениям: наблюдались деструкция мицелл казеина, образование вокруг них сахаридной капсулы и формирование плотных агрегатов, что может негативно сказаться на органолептических и технологических свойствах продукта.

Установлена четкая количественная граница замены сахарозы на аллюлозу. Превышение этого порога ведет к получению продукта, не соответствующего предъявляемым требованиям. Данные электронно-микроскопического анализа подтверждаются результатами реологических, физико-химических и органолептических исследований. Для обеспечения высокого качества разработанного концентрированного молочного продукта доля замены сахарозы на аллюлозу не должна превышать 40 %.

Критерии авторства

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

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

Contribution

All authors contributed equally to the study and are equally responsible 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. Xia Y, Cheng Q, Mu W, Hu X, Sun Z, et al. Research advances of *D*-allulose: An overview of physiological functions, enzymatic biotransformation technologies, and production processes. *Foods*. 2021;10(9):2186. <https://doi.org/10.3390/foods10092186>
2. Van Laar ADE, Grootaert C, Van Camp J. Rare mono- and disaccharides as healthy alternative for traditional sugars and sweeteners? *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2021;61(5):713–741. <https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1743966>
3. Mu W, Zhang W, Feng Y, Jiang B, Zhou L. Recent advances on applications and biotechnological production of *D*-psicose. *Applied Microbiology and Biotechnology*. 2012;94:1461–1467. <https://doi.org/10.1007/s00253-012-4093-1>
4. Петров С. М., Подгорнова Н. М., Тужилкин В. И. Моносахарид аллюлоза как здоровая альтернатива традиционным сахарам и подсластителям. *Сахар*. 2023. № 3. С. 36–41. [Petrov SM, Podgornova NM, Tuzhilkin VI. Monosaccharide allulose as healthy alternative to traditional sugars and sweeteners. *Sahar*. 2023;(3):36–41. (In Russ.)] <https://doi.org/10.24412/2413-5518-2023-3-36-41>
5. Jiang S, Xiao W, Zhu X, Yang P, Zheng Z, et al. Review on *D*-Allulose: *In vivo* metabolism, catalytic mechanism, engineering strain construction, bio-production technology. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. 2020;8:00026. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2020.00026>
6. Adolphus K, Van den Abbeele P, Poppe J, Deyaert S, Baudot A, et al. *D*-Allulose and erythritol increase butyrate production and impact the gut microbiota in healthy adults and adults with type-2 diabetes *ex vivo*. *Beneficial Microbes*. 2025;16(5):573–591. <https://doi.org/10.1163/18762891-bja00071>
7. Zhao Y, Duan X, Zhang J, Ding Y, Liu Q. Advances in the bioproduction of *D*-allulose: A comprehensive review of current status and future prospects. *Food Research International*. 2025;202:115767. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2025.115767>
8. Hu M, Li M, Jiang B, Zhang T. Bioproduction of *D*-allulose: Properties, applications, purification, and future perspectives. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 2021;20(6):6012–6026. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12859>
9. Zhang W, Chen D, Chen J, Xu W, Chen Q, et al. *D*-allulose, a versatile rare sugar: Recent biotechnological advances and challenges. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2023;63(22):5661–5679. <https://doi.org/10.1080/10408398.2021.2023091>
10. Xie X, Li C, Ban X, Yang H, Li Z. *D*-allulose 3-epimerase for low-calorie *D*-allulose synthesis: Microbial production, characterization, and applications. *Critical Reviews in Biotechnology*. 2025;45(2):353–372. <https://doi.org/10.1080/07388551.2024.2368517>
11. Chen Z, Gao X-D, Li Z. Recent advances regarding the physiological functions and biosynthesis of *D*-allulose. *Frontiers in Microbiology*. 2022;13:881037. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.881037>
12. Li W, Zhu Y, Jiang X, Zhang W, Guang C, et al. One-pot production of *D*-allulose from inulin by a novel identified thermostable exoinulinase from *Aspergillus piperis* and *Dorea* sp. *D*-allulose 3-epimerase. *Process Biochemistry*. 2020;99:87–95. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2020.08.021>
13. Zhang Y, Zhou Z, Luan H, Zhang X, Liu M, et al. Advances in the biosynthesis of *D*-allulose. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*. 2024;40:375. <https://doi.org/10.1007/s11274-024-04166-w>
14. Tan JH, Chen A, Bi J, Lim YH, Wong FT, et al. The engineering, expression, and immobilization of epimerases for *D*-allulose production. *International Journal of Molecular Sciences*. 2023;24(16):12703. <https://doi.org/10.3390/ijms241612703>
15. Li Z, Feng L, Chen Z, Hu Y, Fei K, et al. Efficient enzymatic synthesis of *D*-allulose using a novel *D*-allulose-3-epimerase from *Caballeronia insecticola*. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2023;103(1):339–348. <https://doi.org/10.1002/jsfa.12147>

16. Laksmi FA, Nirwantono R, Nuryana I, Agustriana E. Expression and characterization of thermostable *D*-allulose 3-epimerase from *Arthrobacter psychrolactophilus* (Ap DAEase) with potential catalytic activity for bioconversion of *D*-allulose from *D*-fructose. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2022;214:426–438. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.06.117>
17. Li Z, Hu Y, Yu C, Fei K, Shen L, *et al.* Semi-rational engineering of *D*-allulose 3-epimerase for simultaneously improving the catalytic activity and thermostability based on *D*-allulose biosensor. *Biotechnology Journal*. 2024;19(8):2400280. <https://doi.org/10.1002/biot.202400280>
18. Hu M, Li M, Jiang B, Zhang T. Bioproduction of *D*-allulose: Properties, applications, purification, and future perspectives. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 2021;20(6):6012–6026. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12859>
19. Sun Y, Hayakawa S, Ogawa M, Fukada K, Izumori K. Influence of a rare sugar, *D*-psicose, on the physicochemical and functional properties of an aerated food system containing egg albumen. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2008;56(12):4789–4796. <https://doi.org/10.1021/jf800050d>
20. Woodbury TJ, Mauer LJ. Investigation of oligosaccharides and allulose as sucrose replacers in low-moisture wire-cut cookies. *Food Research International*. 2024;192:114844. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2024.114844>
21. Men Y, Zhu P, Zhu Y, Zeng Y, Yang J, *et al.* The development of low-calorie sugar and functional jujube food using biological transformation and fermentation coupling technology. *Food Science & Nutrition*. 2019;7(4):1302–1310. <https://doi.org/10.1002/fsn3.963>
22. Xie X, Yu L, Lin Q, Huang D. Low-calorie *D*-allulose as a sucrose alternative modulates the physicochemical properties and volatile profile of sponge cake. *Journal of Food Science*. 2024;89(10):6296–6307. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.17340>
23. Liu F, Chen S, Pan F, Zhao Z, Liu M, *et al.* Establishment of the biotransformation of *D*-allulose and *D*-allose systems in full-red jujube monosaccharides. *Plants*. 2023;12(17):3084. <https://doi.org/10.3390/plants12173084>
24. Куренков С. А., Куренкова Л. А., Гнездилова А. И. Исследование физико-химических свойств альтернативного сахарозаменителя для производства консервированных молочных продуктов с сахаром. *Известия высших учебных заведений. Пищевая технология*. 2024. № 5–6. С. 21–26. [Kurenkov SA, Kurenkova LA, Gnezdilova AI. Study of physicochemical properties of an alternative sugar substitute for the production of canned dairy products with sugar. *Izvestiya vuzov. Food Technology*. 2024;(5–6):21–26. (In Russ.)] <https://doi.org/10.26297/0579-3009.2024.5-6.3>
25. Куренкова Л. А., Куренков С. А. Изучение возможности замены сахарозы альтернативным осмотически деятельным веществом в технологии концентрированных молочных консервов с сахаром. *Молочнохозяйственный вестник*. 2023. № 4. С. 189–198. [Kurenkova LA, Kurenkov SA. Study of the possibility of replacing sucrose with an alternative osmotically active substance in the technology of concentrated canned milk with sugar. *Molochnokhozayistvenny Vestnik*. 2023;(4):189–198. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/PJXDLW>

Дополнительная информация об авторах / Additional information about the authors

Куренков Сергей Алексеевич / Sergey A. Kurenkov ORCID 0000-0003-3889-4559; eLIBRARY SPIN 3198-1470
Куренкова Людмила Александровна / Lyudmila A. Kurenkova ORCID 0000-0003-1684-1245; eLIBRARY SPIN 2091-1856
Смыков Игорь Тимофеевич / Igor T. Smykov ORCID 0000-0002-5663-3662; eLIBRARY SPIN 6530-5689
Гнездилова Анна Ивановна / Anna I. Gnezdilova ORCID 0000-0001-5484-8291; eLIBRARY SPIN 4828-1392

<https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-1-2624>
<https://elibrary.ru/PONROP>

Оригинальная статья
<https://fptt.ru>

Оценивание неопределенности измерения при определении плотности молока



Д. Н. Хамханова^{1,*}, И. А. Ханхалаева¹,
Э. Б. Битуева¹, Ю. А. Соколова¹, Э. Дамдинсүрэн²

¹ Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления^{ROR}, Улан-Удэ, Россия

² Монгольское агентство стандартизации и метрологии^{ROR}, Улан-Батор, Монголия

Поступила в редакцию: 04.06.2025

Принята после рецензирования: 21.11.2025

Принята к публикации: 13.01.2026

*e-mail: darima19566@yandex.ru

© Д. Н. Хамханова, И. А. Ханхалаева, Э. Б. Битуева,

Ю. А. Соколова, Э. Дамдинсүрэн, 2026



Аннотация.

Обеспечение достоверности результатов измерений является важной задачей во многих отраслях, особенно в пищевой промышленности. Актуальность оценки неопределенности измерений обусловлена требованиями современных стандартов, таких как ISO/IEC 17025 и GUM. Цель исследования – оценить неопределенность измерения плотности молока с использованием ареометрического и пикнометрического методов.

Для оценки неопределенности использовалось моделирование с учетом законов распределения. Основными источниками неопределенности для ареометрического метода стали калибровка термометра и ареометра, а также повторяемость. Для пикнометрического метода учитывались калибровка весов, их разрешение, повторяемость взвешивания, калибровка пикнометра и повторяемость измерений плотности. Разработаны математические модели для обоих методов, определены входные величины и их стандартные неопределенности.

Суммарная стандартная неопределенность для ареометрического метода составила 31 кг/м³, для пикнометрического – 21 кг/м³. Расширенная неопределенность рассчитана для доверительной вероятности $P = 0,95$ с коэффициентом охвата, равным двум. Результаты показали, что неопределенность зависела не только от выбранного метода, но и от погрешностей используемых средств измерений.

Исследование выявило различия в неопределенности измерений между методами, причем пикнометрический метод показал более высокую точность. Полученные результаты подчеркивают важность выбора метода и тщательной калибровки оборудования для снижения неопределенности. Дальнейшие исследования могут быть направлены на изучение дополнительных факторов, влияющих на точность измерений.

Ключевые слова. Измерение, неопределенность, молоко, плотность, метод, калибровка, повторяемость, распределение, модель

Для цитирования: Хамханова Д. Н., Ханхалаева И. А., Битуева Э. Б., Соколова Ю. А., Дамдинсүрэн Э. Оценивание неопределенности измерения при определении плотности молока. Техника и технология пищевых производств. 2026. Т. 56. № 1. С. 86–96. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-1-2624>

Measurement Uncertainty in Milk Density Tests



Darima N. Khamkhanova^{1,*}, Irina A. Khankhalaeva¹,
Elvira B. Bitueva¹, Yuliya A. Sokolova¹, E. Damdinsuren²

¹ East Siberian State University of Technology and Management^{ORCID}, Ulan-Ude, Russia

² Mongolian Agency for Standardization and Metrology^{ORCID}, Ulaanbaatar, Mongolia

Received: 04.06.2025
Revised: 21.11.2025
Accepted: 13.01.2026

*e-mail: darima19566@yandex.ru
© D.N. Khamkhanova, I.A. Khankhalaeva, E.B. Bitueva,
Yu.A. Sokolova, E. Damdinsuren, 2026



Abstract.

Reliable measurements are critical for the food industry. The measurement uncertainty assessment is an obligatory procedure stipulated in modern standards, e. g., general requirements for the competence of testing and calibration laboratories (ISO/IEC 17025); Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM), etc. This research applied the hydrometer and pycnometer techniques to the uncertainty associated with milk density tests.

The tests employed both hydrometer and pycnometer methods. Measurement uncertainty was calculated using the simulation-based approach and uncertainty distribution laws. The hydrometer method revealed such uncertainty sources as thermometer calibration, hydrometer calibration, and repeatability. For the pycnometer method, they included balance calibration, balance resolution, weighing repeatability, pycnometer calibration, and repeatability. Both techniques were provided with mathematical models that incorporated input variables with assigned distribution laws, standard uncertainties for these variables, and the total relative standard uncertainties.

The total standard uncertainty for milk density measurement was 31 kg/m³ for the hydrometer method and 21 kg/m³ for the pycnometer method. The expanded uncertainties were computed at a 95% confidence level with a coverage factor of two. The measurement uncertainty depended on the method and the instrumental errors.

The hydrometer and pycnometer tests showed different measurement uncertainty, depending on the method and instruments employed. The pycnometer method had lower uncertainty and provided more reliable and accurate measurements. Selecting an optimal method and accurate calibration minimize uncertainty; however, additional factors require further research to adapt the models for industrial applications.

Keywords. Measurement, uncertainty, milk, density, method, calibration, repeatability, distribution, model

For citation: Khamkhanova DN, Khankhalaeva IA, Bitueva EB, Sokolova YuA, Damdinsuren E. Measurement Uncertainty in Milk Density Tests. Food Processing: Techniques and Technology. 2026;56(1):86–96. (In Russ.) <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-1-2624>

Введение

Наиболее важными физико-химическими показателями молока являются кислотность, плотность, вязкость, поверхностное натяжение, показатель преломления, электропроводность [1]. Плотность – один из основных физико-химических показателей, по которому оценивается качество молока и соответствие требованиям стандарта. По данным оптической плотности образцов сыворотки молока с учетом степени разведения определяют концентрацию иммунных глобулинов [2]. Натуральное молоко считается востребованным продуктом из-за содержания в нем белка, кальция, витаминов А, D, В₁₂, что особенно важно для детского питания. Кроме того, более высокое потребление молока в подростковом возрасте связано со значительной минеральной плотностью всего скелета, позвоноч-

ника и лучевой кости в период набора пиковой костной массы [3, 4], тогда как текущее потребление кальция может влиять на минеральную плотность костной ткани.

Контроль плотности помогает выявить фальсификацию, в частности при разбавлении молока водой плотность и вязкость снижаются, а значение pH увеличивается [5, 6].

Исследование по оценке влияния плотности молока на эффективность производства сыроделия доказало, что плотность молока оказывает влияние как на технологические, так и на качественные показатели выпускаемой продукции [7].

В ГОСТ Р 54758 для методов определения плотности молока приведены приписанные характеристики погрешности методов: предел повторяемости и предел воспроизводимости, но не описана процедура оцени-

вания неопределенности измерения при исследованиях. Однако при оценке качества молока в соответствии с требованиями п. 7.6 ГОСТ ISO/IEC 17025 в отчетах об испытаниях продукции необходимо указывать неопределенность измерения, что вызывает большие трудности. Сравнительный анализ требований, приведенных в ГОСТ ISO/IEC 17025–2019 и ГОСТ ИСО/МЕК 17025–2009, к компетентности испытательных лабораторий [8] показывает, что требования к оценке неопределенности измерения являются обязательными для обоих стандартов.

Возникают две группы проблем, связанных с внедрением ГОСТ ISO/IEC 17025, первая из которых относится к проблеме неопределенности и прецизионности измерения [9]. Концепция неопределенности измерения внедряется в практику с трудом, что связано с психологическими барьерами. Многие специалисты считают учет неопределенности избыточным, ссылаясь на то, что измерения исторически проводились без него, и сопротивляются изменению, что зачастую связано с недостатком квалификации, ведь расчет неопределенности измерения требует определенных знаний в области метрологии, математической статистики и анализа данных. Переход на новые методы определения достоверности измерений требует переобучения сотрудников, что, в свою очередь, вызывает необходимость инвестиции в обучение, а также увеличивает время на обработку полученных данных. Одним из способов преодоления страха внедрения концепции неопределенности измерений в практику является разработка стандартизированных методик оценивания неопределенности измерения. Это могут быть методики оценивания неопределенности измерения плотности молока ареометрическим и пикнометрическим методами, либо закрепление соответствующей процедуры в стандарте на методы определения плотности молока. В связи с этим возникает актуальная задача разработки процедуры оценивания неопределенности измерения при исследованиях плотности молока. Оценивание неопределенности измерения представляет собой довольно трудоемкий процесс, который требует исследования и учета всех источников неопределенности, составления уравнения измерения, определения корреляционной связи между входными величинами, выявления законов распределения входных величин, а также вычисления стандартной, суммарной и расширенной неопределенности. Актуальность решения поставленной задачи обусловлена необходимостью получения достоверных и воспроизводимых результатов испытаний и достижения международной сопоставимости данных контроля, а также требованиями к указанию неопределенности измерения при испытаниях, которые приведены в ГОСТ ISO/IEC 17025. В аккредитованных лабораториях использование понятия «неопределенность» устанавливается в обязательном порядке. Кроме того, важнейшим этапом

разработки и валидации аналитического метода является оценка неопределенности [10].

Е. Ю. Колесников также отмечает необходимость указывать неопределенность измерения для результатов теоретических исследований [11].

Основными проблемами при выражении неопределенности измерений в практической метрологии являются сложность построения моделей измерений, учет всех возможных влияющих факторов, дальнейший расчет и адекватная оценка результата [12].

Алгоритм расчета неопределенности измерения прописан в ГОСТ 34100.3-2017/ISO/IEC Guide 98-3:2008. Однако расчет по прописанному алгоритму предполагает выявление и исследование всех возможных источников неопределенности. Неполный учет источников неопределенности измерения может привести к неточности моделей измерения. При этом учесть все факторы, влияющие на результат измерения, невозможно, поэтому данный этап является наиболее важным при оценивании неопределенности измерения. При учете источников неопределенности измерения экспериментаторы сталкиваются с недооценкой или переоценкой влияния некоторых факторов. Поэтапный анализ процедуры измерения и выявление источников неопределенности на каждом этапе позволяют приблизиться к наиболее полному учету источников неопределенности измерения при определении плотности молока.

Кроме того, при оценивании неопределенности измерения возникают проблемы, связанные с определением корреляционной связи между отдельными факторами, установлением закона распределения входных величин, а также отсутствием данных о значениях входных величин.

Научная новизна работы заключается в анализе источников неопределенности при установлении плотности молока и составлении математической модели измерения с учетом всех источников неопределенности.

Цель исследования – оценить неопределенность измерения плотности молока с использованием ареометрического и пикнометрического методов.

Объекты и методы исследования

Объекты исследования – ареометрический и пикнометрический методы определения плотности молока, установленные ГОСТ Р 54758-2011.

Ареометрический метод – способ непосредственного измерения плотности жидкостей, в частности молока, ареометром, при котором показатели точности измерения зависят от точности применяемого средства измерения, а именно от пределов повторяемости и воспроизводимости метода, определяемых типом применяемого ареометра.

Пикнометрический метод – высокоточный косвенный способ измерения плотности молока, основанный на определении массы пробы в пикнометре и ее объема, равного объему пикнометра. Следовательно,

показатели точности измерения зависят от погрешности применяемых типов средств измерений – типа весов и пикнометра.

Кроме вышеперечисленных факторов, на результат измерения влияют условия проведения измерений, квалификация оператора (погрешность оператора), повторяемость при взвешивании и т. д. В каждом конкретном случае проводится тщательный анализ величин, влияющих на результат измерения.

Для оценивания неопределенности измерения применен метод моделирования и закон распределения неопределенности. Сущность данного метода заключается в следующем:

1. Выявление источников неопределенности измерения. Устанавливаются все факторы, влияющие на результат измерения.

2. Составление уравнения измерения:

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_m)$$

где Y – выходная величина; $X_1, X_2, \dots, X_m$ – входные величины.

3. Определение оценки входных величин $x_1, x_2, \dots, x_m$ и внесение поправок на известные систематические эффекты в результаты их измерений. Оценки входных величин могут быть оценены статистически, если проводилось многократное измерение входной величины. В противном случае – из внешних источников. Например, в документации производителя весов могут быть указаны три источника неопределенности при взвешивании в таре: прецизионность показаний, считываемость показаний (цифровое разрешение шкалы) а также вклад, обусловленный неопределенностью калибровки шкалы (нелинейность шкалы весов), или предел допустимой погрешности весов.

4. Вычисление оценки результата измерений:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_m)$$

5. Определение стандартных неопределенностей входных величин $u(X_1), u(X_2), \dots, u(X_m)$. Стандартная неопределенность входных величин может быть оценена как статистическими методами (если имеется массив экспериментальных данных), так и иными методами, кроме статистического. Если входные величины имеют разные размерности, то необходимо определить относительные стандартные неопределенности, чтобы можно было сравнивать их в единой шкале.

6. Определение коэффициентов чувствительности входных величин:

$$c_i = \frac{\partial f}{\partial x_i}, i = 1, 2, \dots, m$$

где m – количество входных величин.

7. Вычисление вклада неопределенности каждой входной величины в неопределенность измеряемой величины:

$$c_i \times u(X_i), i = 1, 2, \dots, m$$

8. Определение числа степеней свободы входных величин. При многократных измерениях входной величины число степеней свободы стандартно определяется по формуле $\nu = (n - 1)$, в остальных случаях число степеней свободы принимается равным бесконечности ($\nu = \infty$).

9. Определение распределения вероятностей входных величин. При многократных измерениях входной величины делают предположение, что его распределение подчиняется распределению Гаусса. Если же неопределенность оценивают по малому числу показаний, то считается, что входная величина подчиняется t -распределению Стьюдента. При наличии информации о том, что входная величина лежит в определенном диапазоне значений $[a, b]$, выдвигается гипотеза о равномерном распределении. При условии, что значения входной величины в центре интервала более вероятны, чем вблизи его границ, выдвигается гипотеза о треугольном распределении. Это распределение используют при вычислении стандартной неопределенности объема мерной посуды, т. к. в процессе производства мерной посуды номинальные значения объема более вероятны, чем крайние.

10. Определение попарной ковариации входных величин. Входные величины могут быть попарно коррелированы. В этом случае необходимо учитывать ковариацию двух входных величин, которую определяют через коэффициент корреляции.

11. Составление бюджета неопределенностей, содержащего список всех входных величин ($X_1, X_2, \dots, X_m$), их оценок ($x_1, x_2, \dots, x_m$) вместе с принадлежащими им стандартными неопределенностями измерения $u_i(X_i)$ и законами их распределения, а также числами степеней свободы и коэффициентами чувствительности.

12. Определение суммарной стандартной неопределенности измеряемой величины u_c .

13. Задание уровня доверия P и вычисление коэффициента охвата k_p . При оценивании неопределенности результата многократных измерений Руководство по выражению неопределенности измерения (Санкт-Петербург, 1999) рекомендует в качестве коэффициента охвата брать коэффициенты из распределения Стьюдента для уровня доверия 0,95 и эффективного числа степеней свободы ν_{eff} , определяемого по формуле Велча-Саттерсвейта. В простейшем случае предлагается принять приблизительное значение коэффициента охвата, равное двум, для уровня доверия 0,95.

14. Вычисление расширенной неопределенности измеряемой величины $U(Y)$. Расширенную неопределенность вычисляют путем умножения неопределенности выходной величины (суммарной стандартной неопределенности) на коэффициент охвата: $U(Y) = k \times u_c$.

15. Запись полного результата измерения.

Для выявления источников неопределенности необходимо в первую очередь прописать процедуру

определения плотности молока и воспользоваться рекомендациями ГОСТ 34100.3.2-2017 и QUAM:2012.P1-RU.

Согласно QUAM:2012.P1-RU, при описании неопределенности в аналитических измерениях следует учитывать источники неопределенности при:

– взвешивании: недостаточная точность калибровки весов, предел разрешения дисплея или шкалы (ограниченное разрешение), разнообразные факторы (включая температуру), несовпадение плотности гирь и пробы, вызывающее различие в выталкивающей силе воздуха;

– определении объема жидкости: неопределенность калибровки объема мерной посуды, отличие температуры при проведении эксперимента от той, при которой проводилась калибровка, вызывающее отклонение объема от установленного, различные факторы.

Каждый этап процесса оценивания может быть реализован альтернативными методами [13].

Результаты и их обсуждение

Процедура определения плотности молока ареометрическим и пикнометрическим методами состоит из подготовки пробы и проведения измерений.

Ареометрический метод определения плотности молока. Для выявления источников неопределенности при определении плотности молока ареометрическим методом прописали процедуры их выполнения на этих этапах. На этапе подготовки пробы следует довести температуру молока до 20 ± 2 °С. Следовательно, на этом этапе основным источником неопределенности является температура (T_i).

На этапе проведения измерений выполнялись действия, приведенные в таблице 1.

В работе [14] показано, что при определении плотности жидкости с высокой точностью требуется поддержание стабильных температурных условий в процессе измерения. Таким образом, одним из главных факторов, влияющих на неопределенность измерений, выступают температурные условия.

На этапе определения плотности молока были выявлены такие источники неопределенности, как температура, неопределенность калибровки термометра и неопределенность калибровки ареометра. Поскольку температура является источником неопределенности как на этапе подготовки пробы, так и на этапе измерения, а измерения выполняются одним и тем же термометром, этот источник неопределенности учитывали

только один раз. Источником неопределенности при отборе молока пренебрегали, т. к. небольшое отклонение объема молока не влияет на измерение плотности, т. е. необходимо рассматривать только те источники неопределенности, которые могут способствовать заметным изменениям значения неопределенности. Неопределенность калибровки ареометров сильно зависит от типа ареометров [15].

Формирование модели измерения – исходный этап при вычислении неопределенности измерения [16], поэтому сначала составили математическую модель измерения. Математическая модель измерения при определении плотности молока ареометрическим методом зависит от трех факторов и имеет вид (1):

$$Y = f(X_{11}, X_{12}, X_{13}) \quad (1)$$

где X_{11} – калибровка термометра; X_{12} – калибровка ареометра; X_{13} – повторяемость при определении плотности молока.

Количественное выражение составляющих неопределенности. Для определения стандартных неопределенностей составлена спецификация измерения (табл. 2).

В исследовании [17] указаны неточности средств измерения, к которым можно отнести такие неопределенности, как калибровка, разброс показаний, периодичность калибровки, сравнение и шаг чувствительности. Поэтому в качестве источника неопределенности при измерении температуры принимали калибровку термометра, при измерении плотности молока – калибровку ареометра. В качестве входных величин принимались пределы допускаемой абсолютной погрешности термометра и ареометра соответственно.

Термометры с пределом измерения от 0 до 100 °С и ценой деления 0,5 °С имели предел допускаемой абсолютной погрешности 1,0 °С по ГОСТ 28498. Предел допускаемой погрешности в ГОСТ 28498 приводится без указания доверительного уровня или информации о виде распределения, поэтому было выдвинуто предположение о равномерном распределении. Стандартную неопределенность, обусловленную калибровкой термометра, определяли по формуле (2):

$$u(x_{11}) = \frac{\Delta x_{11}}{\sqrt{3}} \quad (2)$$

где Δx_{11} – предел абсолютной допускаемой погрешности термометра.

Оценкой входной величины могут быть заимствованные из нормативных документов, сертификатов, свидетельств, справочников, этикеток производителя продукции [18], а также данные поверки, калибровки, сведения изготовителя о приборе, техническая документация и т. п. Поверка средств измерения, в отличие от калибровки средств измерений, производится в обязательном порядке, и ее процедура не включает оценки неопределенности измерения.

Таблица 1. Последовательность действий при определении плотности молока

Table 1. Procedure for milk density test

Отбор молока (V_1)	250 или 500 см ³
Измерение температуры (T_2)	20 ± 2 °С
Измерение плотности (ρ_1), не менее 2 раз	1015–1040 г/м ³

Таблица 2. Спецификация измерения плотности молока ареометрическим методом

Table 2. Measuring milk density with hydrometer

Наименование операции	Средство измерения	Диапазон измерений	Погрешность / предел основной допускаемой абсолютной погрешности / предел повторяемости
Определение температуры молока	термометр	от 0–100 °С	1,0 °С
Определение плотности молока	ареометр АМТ	1015–1040 кг/м ³	1,0 кг/м ³
Повторяемость (σ_r)	ареометр АМТ	1015–1040 кг/м ³	0,5 кг/м ³

Ареометры типа АМТ имеют предел допускаемой абсолютной погрешности 1,0 кг/м³, согласно ГОСТ 18481. Предел допускаемой погрешности ареометра в ГОСТ 18481 также приводится без указания доверительного уровня или информации о виде распределения, поэтому было выдвинуто предположение о равномерном распределении. Стандартную неопределенность, обусловленную калибровкой ареометра, определяли по формуле (3):

$$u(x_{12}) = \frac{\Delta x_{12}}{\sqrt{3}} \quad (3)$$

где Δx_{12} – предел абсолютной допускаемой погрешности ареометра.

Неопределенность, вызванную отклонениями при повторных измерениях, устанавливали экспериментально, фиксируя повторяемость результатов. Однако в ГОСТ Р 54758 приведен предел повторяемости измерений на ареометрах типа АМТ, который составляет $u(x_{13}) = 0,5$ кг/м³.

Поскольку выбранные источники неопределенности (входные величины) имели разные размерности, вычисляли стандартные и относительные стандартные неопределенности.

Значения стандартной и относительной стандартной неопределенности при определении плотности молока ареометрическим методом приведены в таблице 3.

При калибровке ареометров абсолютную погрешность определяют в трех числовых отметках, которые расположены в нижней, средней и верхней части шкалы. Определение абсолютной погрешности начинают с нижней отметки. В строке калибровка ареометра указано значение 1015 кг/м³. В строке повторяемость приведено измеренное значение плотности молока – 1030 кг/м³.

Суммарную относительную стандартную неопределенность установления плотности молока ареометрическим методом определили по формуле (4):

$$\frac{U_{C1}}{\rho} = \sqrt{\left(\frac{u(x_{11})}{x_{11}}\right)^2 + \left(\frac{u(x_{12})}{x_{12}}\right)^2 + \left(\frac{u(x_{13})}{x_{13}}\right)^2} \quad (4)$$

где ρ – измеренная плотность молока; x_{11} – температура, при которой проводилась калибровка термо-

Таблица 3. Значения стандартной и относительной стандартной неопределенности при определении плотности молока ареометрическим методом

Table 3. Standard vs. relative standard uncertainty in areometric milk density tests

Источник неопределенности	Значение, x	$u(x)$	$u(x)/x$
Калибровка термометра, °С	20	0,58	0,03
Калибровка ареометра, кг/м ³	1015	0,58	0
Повторяемость, кг/м ³	1030	0,50	0

метра; x_{12} – точка калибровки ареометра; x_{13} – измеренная плотность молока; $u(x_{11})$ – стандартная неопределенность калибровки термометра; $u(x_{12})$ – стандартная неопределенность калибровки ареометра; $u(x_{13})$ – повторяемость.

Относительная стандартная неопределенность установления плотности молока ареометрическим методом составила:

$$\frac{U_{C1}}{\rho} = 0,03$$

При полученном в ходе эксперимента значении плотности молока 1030 кг/м³ суммарная стандартная неопределенность составила:

$$U_{C1} = 1030 \times 0,03 = 31 \text{ кг/м}^3$$

Расширенная неопределенность измерения при выборе k , равного 2, составила:

$$U_1 = k \times U_{C1} = 2 \times 30,9 = 62 \text{ кг/м}^3$$

где k – коэффициент охвата, равный примерно 2,0 при вероятности 0,95.

Результат измерения при $P = 0,95$ имеет вид:

$$\rho = 1030 \pm 62 \text{ кг/м}^3$$

Пикнометрический метод определения плотности молока. Для выявления источников неопределенности при определении плотности молока пикно-

метрическим методом описал процедуру их выполнения согласно этапам. Подготовка к проведению измерения заключалась в измерении пустого пикнометра и пикнометра с дистиллированной водой.

Последовательность действий при подготовке к проведению измерения пикнометрическим методом:

- взвесить пустой пикнометр, m_1 ;
- заполнить пустой пикнометр дистиллированной водой до отметки;
- взвесить пикнометр с дистиллированной водой, m_2 не менее 3 раз.

Следовательно, на этапе подготовки к измерениям к источникам неопределенности могут относиться: ограниченная точность калибровки весов; ограниченное разрешение на дисплее или шкале; неопределенность указанного внутреннего объема пикнометра; отклонения при заполнении колбы до метки; отличие температуры колбы и раствора от температуры, при которой проводилась калибровка пикнометра; повторяемость при взвешивании пикнометра с дистиллированной водой.

- Последовательность действий на этапе измерения:
- заполнить пустой пикнометр анализируемой пробой до метки;
 - взвесить пикнометр с анализируемой пробой не менее 2 раз.

Так, на этапах подготовки к измерениям и измерения источников неопределенности совпадали, поэтому их учитывали только на этапе измерения.

При взвешивании выделяют три источника неопределенности:

- ограниченная точность калибровки весов;
- ограниченное разрешение на дисплее или шкале;
- изменчивость от взвешивания к взвешиванию, влияние плотности и т. д. [19].

При заполнении мерной посуды следует учитывать следующие источники неопределенности:

- неопределенность калибровки пикнометра;
- отличие температуры при проведении эксперимента от той, при которой проводилась калибровка;
- повторяемость.

Плотность молока определяли по формуле (5):

$$\rho = \frac{m_3 - m_1}{m_2 - m_1}(\rho_e - e) + e \quad (5)$$

где m_1 – масса пустого пикнометра; m_2 – масса пикнометра с водой; m_3 – масса пикнометра с продуктом; ρ_e – плотность воды при температуре 20 °С и давлении $1,01 \times 10^5$ Па равна 998,20 кг/м³; ρ_e – плотность воздуха при температуре 20 °С и нормальном давлении ($e = 1,2$ кг/м²).

При отклонении температуры от 20 °С значение плотности воды можно определить по таблице стандартных справочных данных ГСССД 2-77. Атмосферное давление, зависящее от географического положения и высоты над уровнем моря, в ходе проведения измерения не всегда соответствовало нормальному –

101325 Па (760 мм. рт. ст.). Для оценки влияния давления на плотность можно воспользоваться справочными данными о коэффициенте сжимаемости воды [20]. При изменении температуры и атмосферного давления плотность воздуха рассчитывается по формуле Менделеева-Клайперона при заданной температуре и давлении. Следовательно, источники неопределенности, вызванные отклонением температуры и давления от заданных значений, зависят от точности расчета, поэтому ими можно пренебречь.

Таким образом, математическая модель измерения при определении плотности молока пикнометрическим методом зависит от шести факторов и имеет следующий вид (6):

$$Y = f(X_{21}, X_{22}, X_{23}, X_{24}, X_{25}, X_{26}) \quad (6)$$

где X_{21} – ограниченная точность калибровки весов; X_{22} – ограниченное разрешение на дисплее или шкале; X_{23} – изменчивость от взвешивания к взвешиванию (повторяемость при взвешивании); X_{24} – калибровка пикнометра; X_{25} – отличие температуры колбы и раствора от температуры, при которой проводилась калибровка пикнометра; X_{26} – повторяемость при определении плотности молока.

Количественное выражение составляющих неопределенности. Для определения стандартных неопределенностей на этапе измерения плотности молока составлена спецификация измерения (табл. 4).

Оценивание стандартной неопределенности при определении массы пустого пикнометра на весах проводили с использованием данных производителя средства измерений (паспортные данные весов) [21].

Если в сертификате калибровки весов указана неопределенность калибровки, то ее применяли в качестве стандартной неопределенности. В противном случае ее рассчитывали, предполагая равномерное (прямоугольное) распределение допускаемой погрешности весов Δx_{21} , по формуле (7):

$$u(x_{21}) = \frac{\Delta x_{21}}{\sqrt{3}} \quad (7)$$

где Δx_{21} – предел основной допускаемой абсолютной погрешности весов.

Разрешение шкалы весов SHPBГ-215i-ION равно $\Delta x_{22} = 0,01$ мг. Также предполагая равномерное распределение разрешения шкалы, стандартное отклонение от ограниченного разрешения определяли по формуле (8):

$$u(x_{22}) = \frac{\Delta x_{22}}{\sqrt{3}} \quad (8)$$

где Δx_{22} – разрешение шкалы весов SHPBГ-215i-ION.

Изменчивость от взвешивания к взвешиванию определялась как стандартное отклонение трех взвешиваний пустого пикнометра или пикнометра с водой, которое равно $u(x_{23}) = 0,1$ г.

Таблица 4. Спецификация измерения плотности молока пикнометрическим методом

Table 4. Procedure for pycnometric milk density tests

Наименование операции	Средство измерения	Диапазон измерений	Погрешность / предел основной допускаемой абсолютной погрешности / предел повторяемости
Взвешивание пустого пикнометра, не менее трех раз	SHPBG-215i-ION	0–210 г	0,5 мг
Заполнение пикнометра дистиллированной водой	пикнометр ПЖ1	50 мл	0,3 мл
Взвешивание пикнометра с водой, не менее трех раз	SHPBG-215i-ION	0–210 г	0,01 мг
Заполнение пикнометра пробой	пикнометр ПЖ1	50 мл	0,3 мл
Взвешивание пикнометра с пробой	SHPBG-215i-ION	0–210 г	0,01 мг

Таблица 5. Значения стандартной и относительной стандартной неопределенности при определении плотности молока пикнометрическим методом

Table 5. Standard vs. relative standard uncertainty in pycnometric milk density tests

Источники неопределенности	Значение, x	$u(x)$	$u(x)/x$
Ограниченная точность калибровки весов в середине диапазона измерения, г	110	0,06	0
Ограниченное разрешение на дисплее или шкале при взвешивании пикнометра с молоком, мг	90	0,01	0
Повторяемость при взвешивании, г	40	0,10	0
Калибровка пикнометра, мл	50	0,12	0
Объемное расширение раствора из-за отклонения температуры от температуры, при которой проводилась калибровка пикнометра, 1/°C	22	0,34	0,02
Повторяемость при определении плотности молока, кг/м ³	1300	0,30	0

При заполнении пикнометра дистиллированной водой и анализируемой пробой источниками неопределенности являются калибровка, температура и повторяемость [22]. Производитель мерной посуды указывает объем пикнометра $50 \pm 0,3$ мл при 20 °C согласно ГОСТ 22524. Предельное отклонение объема Δx_{24} приведено без указания доверительного уровня или информации о виде распределения, поэтому требовалось дополнительное предположение. Стандартная неопределенность вычислялась исходя из предположения о треугольном распределении:

$$u(x_{24}) = \frac{\Delta x_{24}}{\sqrt{6}} \quad (9)$$

где Δx_{24} – предельное отклонение объема пикнометра.

Треугольное распределение выбрано, т. к. в реальном процессе производства мерной посуды номинальные значения объема более вероятны, чем крайние значения. Распределение вероятностей, получающееся в результате, лучше аппроксимировать треугольным распределением, чем прямоугольным [22].

Мерную посуду калибруют при температуре 20 °C, в то время как температура в лаборатории колеблется в пределах ± 2 °C. Неопределенность, вызванную изменением температуры, вычисляли в соответствии с указанным диапазоном температур и коэффициентом объемного расширения. Объемное расширение жидкостей существенно больше, чем объемное расширение

стекла, поэтому следует учитывать только первую составляющую. Коэффициент объемного расширения молока рассчитывали на основании изменения его плотности в зависимости от температуры, соответствующей ГОСТ Р 54758. К значению плотности 1030,0 кг/м³ при температуре 18,0 °C относится приведенное к 20 °C значение плотности 1029,4 кг/м³. К значению плотности 1030,0 кг/м³ при температуре 22,0 °C соответствует приведенное к температуре 20 °C значение плотности 1030,6 кг/м³. Следовательно, при снижении и увеличении температуры на 2 °C изменение плотности молока составляло 0,6 кг/м³. Стандартная неопределенность рассчитывалась с учетом предположения о прямоугольном распределении:

$$u(x_{25}) = \frac{\Delta x_{25}}{\sqrt{3}} \quad (10)$$

Повторяемость при определении плотности молока можно установить экспериментально. Однако предел повторяемости пикнометрического метода также указан в ГОСТ Р 54758 – 0,3 кг/м³. Стандартную повторяемость приняли равной $u(x_{26}) = 0,3$ кг/м³.

Значения стандартной и относительной стандартной неопределенности при определении плотности молока пикнометрическим методом приведены в таблице 5.

Суммарная относительная стандартная неопределенность установления плотности пикнометрическим методом составила:

$$\frac{U_c}{\rho} = \sqrt{\left(\frac{u(x_{21})}{x_{21}}\right)^2 + \left(\frac{u(x_{22})}{x_{22}}\right)^2 + \left(\frac{u(x_{23})}{x_{23}}\right)^2 + \left(\frac{u(x_{24})}{x_{23}}\right)^2 + \left(\frac{u(x_{25})}{x_{25}}\right)^2 + \left(\frac{u(x_{26})}{x_{26}}\right)^2} = 0,02$$

При полученном в ходе эксперимента значении плотности молока 1030 кг/м^3 суммарная стандартная неопределенность составила:

$$U_c = 1030 \times 20,6 = 21 \text{ кг/м}^3$$

Выбирая значение доверительной вероятности $P = 0,95$, рассчитывали значения расширенной неопределенности.

Расширенная неопределенность измерения при выборе k , равного 2, составила:

$$U = k \times U_c = 2 \times 20,6 = 41 \text{ кг/м}^3$$

где k – коэффициент охвата, равный примерно 2,0, при вероятности 0,95.

Результат измерения при $P = 0,95$ имеет вид:

$$\rho = 1030 \pm 41 \text{ кг/м}^3$$

Средства измерения, используемые при проведении исследования, обычно поверяются. Но как известно, процедура оценивания неопределенности измерения при поверке средств измерения не является обязательной, поэтому в свидетельстве о поверке не приводятся данные о неопределенности. В связи с этим, при расчете стандартной неопределенности, обусловленной неточностью средств измерений, ориентировались на данные производителя или предельно допустимые значения погрешности, установленные в нормативной документации на данные средства измерений.

Значение относительной стандартной неопределенности от ограниченного разрешения на дисплее весов настолько незначительно, что представляется возможным пренебречь им (табл. 5).

По ГОСТ Р 54758-2011 предел повторяемости при определении плотности молока ареометром типа АМ составляет $0,5 \text{ кг/м}^3$, предел воспроизводимости –

$0,8 \text{ кг/м}^3$, а при определении плотности молока пикнометрическим методом пределы повторяемости и воспроизводимости составляют $0,3 \text{ кг/м}^3$, что значительно точнее.

Полученные в ходе исследования значения неопределенности измерения ареометрическим и пикнометрическими методами составили 31 и 21 кг/м^3 соответственно, что доказывает точность пикнометрического метода, хотя при определении плотности молока пикнометрическим методом выявлено пять источников неопределенности, а ареометрическим методом – три.

Выводы

Таким образом, суммарная относительная стандартная неопределенность измерения плотности молока ареометрическим методом составила 31 кг/м^3 , пикнометрическим методом – 21 кг/м^3 , что свидетельствует о более высокой точности пикнометрического метода. Неопределенность измерения зависит не только от выбранного метода, но и от типов, используемых средств измерений.

Критерии авторства

Все авторы внесли равный вклад в исследование и подготовку публикации.

Конфликт интересов

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

Contribution

The authors contributed equally to this work and bear equal responsibility for any potential plagiarism.

Conflict of interest

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

Список литературы / References

1. Šestan I, Odobasic A, Bratovic A. The effect of heat treatment on the physical-chemical properties of milk. *Academia Journal of Environmental Science*. 2016;4(7):131–136. <https://doi.org/10.15413/ajes.2016.0306>
2. Веселовский С. Ю., Гиро Т. М., Попова О. М., Агольцов В. А. Определение физико-химических показателей, содержание некоторых макро- и микроэлементов в молоке коров, больных бруцеллезом. *Вестник ВСГУТУ*. 2020. № 1. С. 5–10. [Veselovsky SYu, Giro TM, Popova OM, Agoltcov VA. Determination of physical and chemical parameters, the content of some macro and microelements in the milk of cows with brucellosis. *ESSUTM Bulletin*. 2020;(1):5–10. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/LXOYLL>
3. Teegarden D, Lyle RM, Proulx WR, Johnston CC, Weaver CM. Previous milk consumption is associated with greater bone density in young women. *The American Journal of Clinical Nutrition*. 1999;69(5):1014–1017. <https://doi.org/10.1093/ajcn/69.5.1014>

4. Kalkwarf HJ, Khoury JC, Lanphear BP. Milk intake during childhood and adolescence, adult bone density, and osteoporotic fractures in US women. *The American Journal of Clinical Nutrition*. 2003;77(1):257–265. <https://doi.org/10.1093/ajcn/77.1.257>
5. Vujadinović D, Beribaka M, Vukić M, Marjanović-Balaban Ž. Comparison of milk density measurement techniques. *Journal of Hygienic Engineering and Design*. 2017;18:19–24.
6. Tadesse H, Tamene A, Dessie G. Microbial quality and prevalence of water adulteration of pasteurized milk marketed in Addis Ababa, Ethiopia. *Journal of Pure and Applied Microbiology*. 2025;19(1):392–400. <https://doi.org/10.22207/JPAM.19.1.29>
7. Портной А. И. Плотность молока как определяющий показатель качества сырья для сыроделия. Актуальные проблемы интенсивного развития животноводства. 2020. № 23. С. 3–10. [Portnoy AI. Milk density as a key indicator of raw material quality in cheese production. *Current Issues of Intensive Animal Husbandry*. 2020;(23):3–10. (In Russ.)]
8. Гусарова С. Н., Ерохина Ю. М., Крамок Д. И., Хунузиди Е. И. Рекомендации для испытательных лабораторий по переходу на новые требования ГОСТ ISO/IEC 17025–2019. Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2020. Т. 86. № 2. С. 69–78. [Gusarova SN, Erokhina YuM, Kramok DI, Khunuzidi EI. Recommendations for test lab regarding transition to new requirements GOST ISO/IEC 17025–2019. *Industrial laboratory. Diagnostics of materials*. 2020;86(2):69–78. (In Russ.)] <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2020-86-2-69-78>
9. Левин С. Ф. Измерительные задачи оценивания соответствия в инфраструктуре качества. Измерительная техника. 2025. Т. 74. № 1. С. 63–76. [Levin SF. Measurement problems of conformity assessment in the quality infrastructure. *Izmeritel'naya Tekhnika*. 2025;74(1):63–76. (In Russ.)] <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2025-1-63-76>
10. Барановская В. Б., Медведевских М. Ю. Валидация методик химического анализа: международные требования. Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2018. Т. 84. № 12. С. 25–31. [Baranovskaya VB, Medvedevskikh MYu. Validation of analytical methods: The international requirements. *Industrial laboratory. Diagnostics of materials*. 2018;84(12):25–31. (In Russ.)] <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2018-84-12-25-31>
11. Колесников Е. Ю. Неопределенность: качественный и количественный аспекты. Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2023. Т. 89 № 7. С. 78–86. [Kolesnikov EYu. Uncertainty: Qualitative and quantitative aspects. *Industrial laboratory. Diagnostics of materials*. 2023;89(7):78–86. (In Russ.)] <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2023-89-7-78-86>
12. Понкратенко А., Давыдов В. Понятие неопределенности измерений и его развитие в отечественной метрологии. Роль технического регулирования и стандартизации в эпоху цифровой экономики: материалы V Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых. Екатеринбург: Ажур, 2023. С. 353–360. [Ponkratenko A, Davydov V. Measurement uncertainty in domestic metrology. Technical regulation and standards in the era of the digital economy: Proceeding Intern. Sci. Conf. Ekaterinburg; 2023. pp. 353–360. (In Russ.)]
13. Serenkov PS, Romanchak VM, Hrybkouski AV. A morphological approach to development of a process for measurement uncertainty estimation. *Devices and Methods of Measurements*. 2024;15(2):110–119. <https://doi.org/10.21122/2220-9506-2024-15-2-110-119>
14. Баковец Н. В., Козадаев К. В. Стабилизация температурных условий при определении плотности жидкости методом гидростатического взвешивания. Приборы и методы измерений. 2024. Т. 15. № 4. С. 334–341. [Bakovets NV, Kozadayev KV. Stabilization of environmental conditions when liquid density measuring by hydrostatic weighting. *Devices and Methods of Measurements*. 2024;15(4):334–341. (In Russ.)] <https://doi.org/10.21122/2220-9506-2024-15-4-334-341>
15. Loreface S, Malengo A. Calibration of hydrometers. *Measurement Science and Technology*. 2006;17(10):2560. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/17/10/005>
16. Чуновкина А. Г. Оценивание неопределенности измерений при установлении метрологической прослеживаемости результатов клинических исследований биологических проб. Лабораторная служба. 2020. Т. 9. № 3. С. 32–40. [Chunovkina AG. Evaluation of measurement uncertainty at establishing metrological traceability of results of clinical studies of biological samples. *Laboratory Service*. 2020;9(3):32–40. (In Russ.)] <https://doi.org/10.17116/labs2020903132>
17. Ortiqov K. The importance of analyzing sources of uncertainty in product quality control. *Scientific Impulse*. 2023;2(16):244–257.
18. Шертайлакова Г. М., Муродов Д. Ш. Некоторые виды неопределенности измерений. Экономика и социум. 2024. № 5–1. С. 1827–1830. [Shertailakov GM, Murodov DSh. Some types of measurement uncertainty. *Ekonomika i socium*. 2024;(5–1):1827–1830. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/QMYPHU>
19. Хамханова Д. Н., Митыпова Н. В., Балдынова Ф. П., Дамдинсүрэн Э. Оценивание неопределенности измерения при определении содержания жира в молоке. Метод с использованием анализатора типа «Клевер-2». Контроль качества продукции. 2023. № 8. С. 38–42. [Khamkhanova DN, Mitypova NV, Baldynova FP, Damdinsuren E. Estimation of measurement uncertainty in determining the fat content in milk. A method using a “Klever-2” type analyzer. *Production Quality Control*. 2023;(8):38–42. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/CVJTQU>
20. Александров А. А., Трахтенгерц М. С. Теплофизические свойства воды при атмосферном давлении. М.: Издательство стандартов, 1977. 100 с. [Aleksandrov AA, Trakhtengerts MS. Thermophysical properties of water at atmospheric pressure. Moscow: Izdatelstvo standartov; 1977. 100 p. (In Russ.)]

21. Фадейкина О. В., Воропаев А. А., Давыдов Д. С., Волкова Р. А. Оценка неопределенности результатов измерений при определении потери в массе при высушивании биологических лекарственных препаратов. Биопрепараты. Профилактика, диагностика, лечение. 2023. Т. 23. № 3–1. С. 452–462. [Fadeikina OV, Voropaev AA, Davydov DS, Volkova RA. Estimation of measurement uncertainty for the determination of loss on drying of biologicals. Biological Products. Prevention, Diagnosis, Treatment. 2023;23(3–1):452–462. (In Russ.)] <https://doi.org/10.30895/2221-996X-2023-23-3-1-452-462>

22. Хамханова Д. Н., Митыпова Н. В., Балдынова Ф. П., Дамдинсүрэн Э. Оценивание неопределенности измерений при определении содержания жира в молоке. Стандартный метод. Контроль качества продукции. 2023. № 7. С. 33–37. [Khamkhanova DN, Mitypova NV, Baldynova FP, Damdinsuren E. Estimation of measurement uncertainty in determining the fat content in milk. Standard method. Production Quality Control. 2023;(7):33–37. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/FCANMI>

Дополнительная информация об авторах / Additional information about the authors

Хамханова Дарима Нимбуевна / Darima N. Khamkhanova ORCID 0000-0003-2432-212X; eLIBRARY SPIN 1303-5049

Ханхалаева Ирина Архиповна / Irina A. Khankhalaeva ORCID 0000-0002-6159-1006; eLIBRARY SPIN 2667-0717

Битуева Эльвира Борисовна / Elvira B. Bitueva ORCID 0000-0003-1937-4101; eLIBRARY SPIN 8758-4536

Соколова Юлия Александровна / Yuliya A. Sokolova eLIBRARY SPIN 9670-0089

Дамдинсүрэн Энхмаа / Damdinsuren Enkhmaa ORCID 0000-0003-2176-0597; eLIBRARY SPIN 9421-0075

<https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-1-2625>
<https://elibrary.ru/MXWXVR>

Оригинальная статья
<https://fptt.ru>

Получение целлюлозы и гемицеллюлоз из депектинизированного и делигнифицированного свекловичного жома



С. О. Семенихин*, А. А. Фабрицкая, Н. М. Даишева

Краснодарский научно-исследовательский институт хранения и переработки
сельскохозяйственной продукции, Краснодар, Россия

Поступила в редакцию: 08.09.2025

Принята после рецензирования: 14.10.2025

Принята к публикации: 13.01.2026

*e-mail: semenikhin_s_o@mail.ru

© С. О. Семенихин, А. А. Фабрицкая, Н. М. Даишева, 2026



Аннотация.

Современные технологии производства пищевых продуктов невозможны без применения функциональных добавок, особенно полисахаридов, проявляющих технологические свойства загустителей, стабилизаторов, эмульгаторов. Особый интерес представляют целлюлоза и гемицеллюлозы, которые в России не производятся. Цель исследования – разработка технологических режимов получения из депектинизированного и делигнифицированного свекловичного жома целлюлозы и гемицеллюлоз, соответствующих по своим показателям качества требованиям действующей нормативной документации – ГОСТ и ТР ТС.

Объекты исследования – свекловичный жом и получаемые из него целлюлоза и гемицеллюлозы. В работе рассмотрено влияние концентрации растворов гидроксида натрия и продолжительности обработки свекловичного жома на эффективность извлечения гемицеллюлоз, действие промывки получаемых гемицеллюлоз этанолом на их чистоту, а также воздействие обработки целлюлозосодержащего концентрата растворами соляной кислоты на результативность получения целлюлозы. Органолептические и физико-химические показатели определяли согласно общепринятым методикам.

Установлено, что увеличение концентрации раствора гидроксида натрия и продолжительности обработки свекловичного жома оказывает существенное влияние на химический состав и выход извлекаемых гемицеллюлоз. Наибольший выход гемицеллюлоз наблюдался при концентрации раствора гидроксида натрия в диапазоне 1,5–3,0 %, при дальнейшем ее увеличении происходило частичное снижение содержания гемицеллюлоз вследствие протекания реакций щелочного гидролиза. Также показано, что при щелочной экстракции совместно с гемицеллюлозами частично извлекается пектин, что может быть связано со сходством механизмов извлечения данных гидроколлоидов. Однако процесс сопутствующего извлечения пектина при щелочном извлечении гемицеллюлоз требует проведения более глубоких исследований. В результате исследования установлены эффективные режимы получения целевых продуктов: гемицеллюлозы извлекают экстракцией 2 % раствором гидроксида натрия в течение 3 ч при 25 °С с последующей двукратной промывкой 70 % этанолом; целлюлозу получают в ходе обработки 15 % раствором соляной кислоты в течение 5 ч при 60 °С. Целлюлоза и гемицеллюлозы, полученные в рамках исследования, по органолептическим и физико-химическим показателям соответствуют требованиям ГОСТ за исключением происхождения сырья.

Свекловичный жом является перспективным источником целлюлозы и гемицеллюлоз, что позволит обеспечить импортозамещение и повысить переработку вторичных ресурсов. Однако для использования свекловичных целлюлозы и гемицеллюлоз в пищевой промышленности требуется разработка нормативной документации.

Ключевые слова. Свекловичный жом, целлюлоза, гемицеллюлозы, гидролиз, экстракция, минеральная кислота, щелочь, пищевые добавки

Финансирование. Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда и Кубанского научного фонда в рамках проекта № 24-26-20065, <https://rscf.ru/project/24-26-20065/>

Для цитирования: Семенихин С. О., Фабрицкая А. А., Даишева Н. М. Получение целлюлозы и гемицеллюлоз из депектинизированного и делигнифицированного свекловичного жома. Техника и технология пищевых производств. 2026 Т. 56. № 1 С. 97–110. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-1-2625>

Obtaining Cellulose and Hemicelluloses from Depectinized and Delignified Sugar Beet Pulp



Semyon O. Semenikhin*, Alla A. Fabritskaya, Nailya M. Daisheva

Krasnodar Research Institute for Storage and Processing of Agricultural Products, Krasnodar, Russia

Received: 08.09.2025

Revised: 14.10.2025

Accepted: 13.01.2026

*e-mail: semenikhin_s_o@mail.ru

© S.O. Semenikhin, A.A. Fabritskaya, N.M. Daisheva, 2026



Abstract.

Advanced food production relies heavily on functional additives. Polysaccharides are functional food additives that combine the technological properties of thickeners, stabilizers, and emulsifiers. The absence of domestic cellulose and hemicellulose production remains a significant barrier to import substitution in Russia. This article introduces new processing technologies for producing commercial cellulose and hemicellulose from depectinized and delignified sugar beet pulp.

The experiment featured the effect of such variables as sodium hydroxide concentration and processing time on the efficiency of hemicellulose extraction. The obtained cellulose and hemicellulose were tested for the effect of washing on purity, as well as the effect of hydrochloric acid treatment on cellulose yield. The sensory and physicochemical tests involved standard research methods.

The most effective production conditions were as follows. Hemicellulose was extracted with a 2% sodium hydroxide solution at 25°C for 3 h and washed with 70% ethanol. Cellulose was treated with a 15% hydrochloric acid solution for at 60°C 5 h. The resulting cellulose and hemicellulose met the sensory and physicochemical standards in all aspects but raw material.

Beet pulp proved to be a promising source of cellulose and hemicellulose with good import substitution and recycling prospects. However, the use of beet cellulose and hemicellulose in the food industry requires updating the existing regulatory documentation.

Keywords. Sugar beet pulp, cellulose, hemicelluloses, hydrolysis, extraction, mineral acid, alkali, food additives

Funding. The study was supported by the Russian Science Foundation and the Kuban Science Foundation (Project No. 24-26-20065, <https://rscf.ru/en/project/24-26-20065/>)

For citation: Semenikhin SO, Fabrichskaya AA, Daisheva NM. Obtaining Cellulose and Hemicelluloses from Depectinized and Delignified Sugar Beet Pulp. Food Processing: Techniques and Technology. 2026;56(1):97–110. (In Russ.) <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-1-2625>

Введение

Для достижения нужного качества продуктов в современном производстве необходимы пищевые добавки. Ключевую роль среди них занимают полисахариды: целлюлоза и гемицеллюлозы. Их используют в качестве загустителей, стабилизаторов, эмульгаторов, а также для удержания влаги и предотвращения слеживания. В настоящее время на российском рынке пищевые добавки – целлюлоза (E426) и гемицеллюлозы (E460) – не производятся и представлены только дорогостоящими импортными аналогами, в основном китайского производства.

Целлюлоза является нерастворимым компонентом клеточных стенок растений, отличается высокой сорбционной активностью и способностью связывать значительное количество влаги. Введение целлюлозы в рецептуру пищевых продуктов способствует повышению их влагоудерживающей и жиростойкости

способности, стабилизации текстуры [1, 2]. Указанные свойства позволяют использовать целлюлозу в составе хлебобулочных, мясных и кондитерских изделий для улучшения их структурно-механических характеристик и продления сроков хранения [3–7]. Целлюлоза выступает в качестве пищевых волокон, обеспечивающих антитоксический эффект, нормализацию работы желудочно-кишечного тракта, снижение калорийности и формирование пролонгированного чувства насыщения [8, 9]. Эти качества определяют ее востребованность при производстве диетических и функциональных продуктов питания. Существуют способы производства растворимой целлюлозы, из которой в дальнейшем возможно получение эфиров, востребованных в пищевой промышленности и косметике [10].

Гемицеллюлозы представляют собой группу полисахаридов с более сложным и разнообразным строе-

нием, однако в большей степени преобладают две основные их разновидности: ксилоглюкан и арабиноксилан [11]. Структурная неоднородность молекул гемицеллюлоз определяет их широкую функциональную активность: в отличие от целлюлозы, гемицеллюлозы частично растворимы в воде и способны формировать вязко-эластические системы, что позволяет использовать их в качестве стабилизаторов, загустителей и эмульгаторов [12,13]. Их присутствие в составе рецептур способствует улучшению органолептических характеристик готовых изделий, повышению вязкости и однородности консистенции, предотвращению расслоения эмульсионных и суспензионных систем [14]. Важным свойством гемицеллюлоз является способность образовывать комплексы с белками и связывать ионы металлов, что при производстве пищевых продуктов обеспечивает придание им функциональных свойств [15].

Применение целлюлозы и гемицеллюлоз в пищевых технологиях представляет собой один из ключевых факторов целенаправленного формирования их потребительских свойств. Сочетание технологических преимуществ полисахаридов с возможностью получения их из вторичного сырья открывает перспективы для создания продуктов функционального и специализированного назначения.

Традиционными источниками получения целлюлозы выступают отходы деревообрабатывающей промышленности. Для ее выделения применяются химические методы, включающие щелочную, сульфатную или сульфитную обработку древесины, что позволяет разрушить матрицу лигнина и высвободить целлюлозные волокна [16]. В современных исследованиях в качестве сырья для получения целлюлозы рассматривают отходы пищевой промышленности (солома злаковых культур, оливковые косточки, пустые грозди плодов масличной пальмы) и различное нетрадиционное сырье: астрагал, шандра обыкновенная, семена фиников, фуражные бобы и др. [17–24].

Гемицеллюлозы преимущественно извлекаются из побочных продуктов переработки сои [25]. В ряде научных исследований рассматриваются отходы деревообрабатывающей промышленности (бука, березы, эвкалипта, агбы), пищевой промышленности (солома злаковых культур, пивная дробина, стебли кукурузы) и нетипичное сырье – африканская роза, сахарное сорго, ежа сборная, бамбук и др. [12, 13, 26–34]. В промышленности для выделения гемицеллюлоз применяют щелочной или ферментативный гидролиз и экстракцию горячей водой под давлением, что обеспечивает разрушение межмолекулярных связей и переход гемицеллюлоз в экстрагент [13]. В качестве перспективных технологий получения гемицеллюлоз рассматривают мембранную фильтрацию, ультразвуковую обработку и обработку электромагнитными полями.

В настоящее время особое значение приобретает вопрос рационального использования растительного

сырья и вторичных ресурсов пищевой промышленности [35]. Учитывая, что целлюлоза и гемицеллюлозы имеют структурный состав клеточных стенок всех растений, переработка отходов кажется более рациональной и приводит к появлению многотоннажных пищевых продуктов. В этом случае перспективным сырьем выступает свекловичный жом – побочный продукт свеклосахарной промышленности, используемый в качестве корма для крупного рогатого скота.

Сухие вещества свекловичного жома на 80 % состоят из пищевых волокон: целлюлозы (25–26 %), гемицеллюлоз (25–26 %), пектиновых веществ (19–20 %) и лигнина (6–9 %), а также белков (7–8 %), минеральных веществ (4–5 %) и остаточной влаги (8–10 %). Анализ литературы показывает, что исследуемое сырье, как правило, содержало 30–60 % целлюлозы, гемицеллюлозы – 20–40 % и лигнина – 20–40 % [17–34]. В ряде исследований отмечается, что наиболее эффективным способом извлечения гемицеллюлоз из отходов деревообрабатывающей промышленности и пищевых производств является щелочная экстракция: концентрация раствора щелочи должна составлять около 10–15 %. Свекловичный жом содержит значительное количество пектиновых веществ, выступающих в качестве связующего звена между слоями клеточной стенки растений. После депектинизации проницаемость клеточной стенки свекловичного жома должна быть выше, а концентрация раствора щелочи – ниже. Из-за высокого содержания пектиновых веществ свекловичный жом ранее рассматривался в основном как перспективный источник низкоэтерифицированного пектина [36–39]. Однако побочный продукт, получаемый после депектинизации жома, до сих пор не находил дальнейшего применения.

Комплексная переработка свекловичного жома с получением пектина, целлюлозы и гемицеллюлоз позволит не только решить экологическую задачу утилизации вторичных ресурсов пищевой промышленности, но и создать дополнительную ценность за счет производства пищевых добавок, востребованных при изготовлении пищевых продуктов. Такой подход соответствует современным концепциям безотходных и ресурсосберегающих технологий, направленных на повышение эффективности агропромышленного комплекса.

Цель исследования – разработка технологических режимов получения целлюлозы и гемицеллюлоз из депектинизированного и делигнифицированного свекловичного жома, соответствующих по своим показателям качества требованиям действующей нормативной документации – ГОСТ и ТР ТС.

В соответствии с поставленной целью определены следующие задачи:

– изучить влияние обработки депектинизированного и делигнифицированного свекловичного жома растворами гидроксида натрия на эффективность извлечения гемицеллюлоз;

- оценить влияние кратности промывки осадка гемицеллюлоз на содержание в нем целевых веществ и золы;
- определить влияние обработки целлюлозосодержащего концентрата растворами соляной кислоты на эффективность очистки целлюлозы;
- установить соответствие органолептических и физико-химических показателей качества полученных целлюлозы и гемицеллюлоз требованиям действующей нормативной документации – ГОСТ и ТР ТС.

Из-за высокого содержания пектиновых веществ технология извлечения целлюлозы и гемицеллюлоз из свекловичного жома включает больше стадий, чем при работе с традиционным сырьем. Несмотря на это, его комплексная переработка позволяет получить широкий спектр ценных продуктов – пищевые добавки.

За основу рационального получения целлюлозы и гемицеллюлоз из свекловичного жома была принята структурная схема, приведенная на рисунке 1.

Объекты и методы исследования

Объекты исследования – делигнифицированный депектинизированный свекловичный жом (ДДСЖ) и получаемые из него целлюлоза и гемицеллюлозы.

Прессованный свекловичный жом производства ООО «Павловский сахарный завод» (Краснодарский край, Россия) использовали для получения ДДСЖ в соответствии с ранее апробированными технологическими режимами.

Вначале проводили депектинизацию прессованного свекловичного жома, далее измельчали и просеивали,

затем получали фракцию с размером частиц менее 2 мм. Параллельно с измельчением жома готовили экстрагент, подкисляя дистиллированную воду до значения pH 3,0 соляным буфером – водным раствором с содержанием соляной кислоты (HCl) 2,5 % и хлорида натрия (NaCl) 2,5 %. На следующем этапе проводили извлечение пектина при соотношении жом:экстрагент, равном 1:4, температуре 55 °С и постоянном перемешивании с частотой 2 с⁻¹ в течение 3 ч. Далее пектинсодержащий экстракт отделяли фильтрованием, депектинизированный свекловичный жом прессовали на ручном лабораторном винтовом прессе при постоянном усилии (моменте кручения). Пектинсодержащий экстракт смешивали с жомопрессовой водой, после чего утилизировали, т. к. выделение пектина не являлось целью данной работы.

Вслед за этим осуществляли делигнификацию депектинизированного свекловичного жома. Для этого его смешивали с 2 % раствором перекиси водорода (H₂O₂) в соотношении 1:4 при температуре 25 °С и постоянном перемешивании с частотой 2 с⁻¹ в течение 3,5 ч. Водную фазу отделяли фильтрованием, а ДДСЖ прессовали на ручном лабораторном винтовом прессе при постоянном усилии (моменте кручения). Затем жомопрессовую воду объединяли с водной фазой. Полученную водную фазу утилизировали.

Для оценки влияния обработки ДДСЖ гидроксидом натрия на экстракцию гемицеллюлоз предварительно определяли его биохимический состав. Материал разделяли на 9 равных частей для прове-

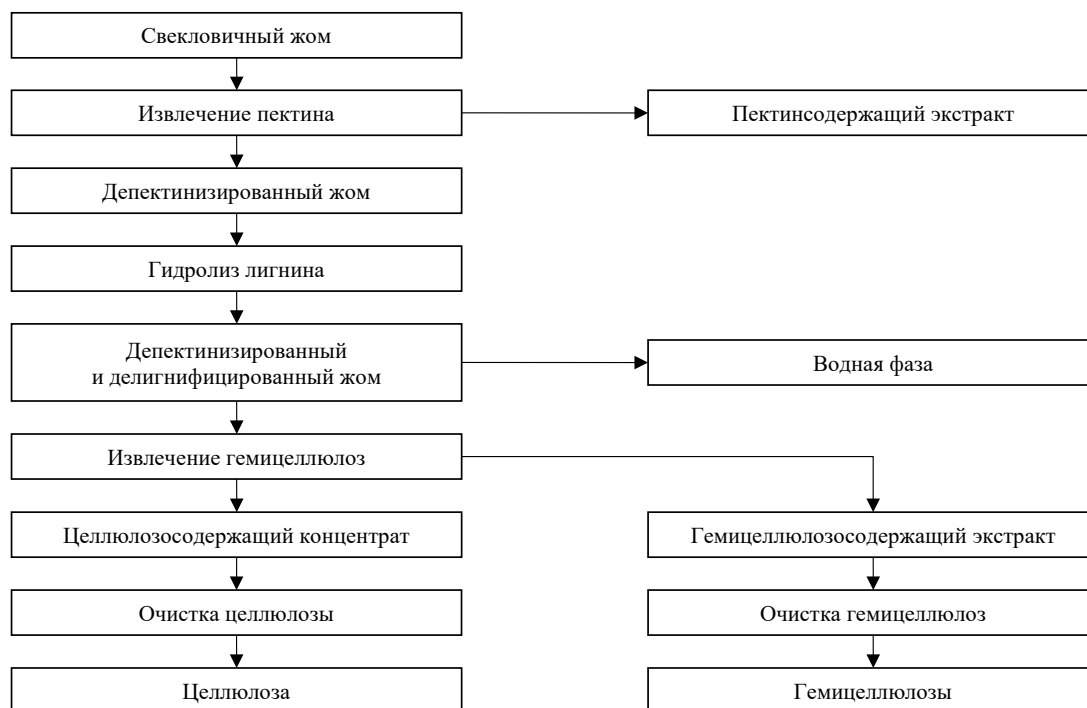


Рисунок 1. Структурная схема получения целлюлозы и гемицеллюлоз из свекловичного жома

Figure 1. Obtaining cellulose and hemicellulose from sugar beet pulp

дения экспериментов с варьированием концентрации щелочи и времени процесса. Предварительными исследованиями установлены и приняты в качестве постоянных факторов режимы, которые обеспечивают оптимальный гидродинамический режим в системе «ДДСЖ – раствор гидроксида натрия»: температура процесса 25 °С, соотношение компонентов 1:4 и частота перемешивания 2 с⁻¹.

Переменными факторами выступали: концентрация гидроксида натрия (X_1), %, в диапазоне 1–5 с шагом 2 и продолжительность процесса (Y_1), мин, в диапазоне 60–180 с шагом 60.

Функциями отклика приняты показатели, %: Z_1 – содержание гемицеллюлоз; Z_2 – содержание пектина; Z_3 – содержание редуцирующих веществ; Z_4 – содержание азотистых веществ; Z_5 – содержание золы.

После завершения экстракции гемицеллюлоз смесь фильтровали. Фильтрационный осадок представлял собой целлюлозосодержащий концентрат. В фильтрат (гемицеллюлозосодержащий экстракт) вносили 96 % этанол в количестве, вдвое превышающем его объем. Образовавшийся осадок гемицеллюлоз отделяли фильтрованием, промывали горячей (90–95 °С) дистиллированной водой (в том же соотношении 1:2 к исходному объему фильтрата) и высушивали. Высушенные образцы гемицеллюлоз отбирали для дальнейших исследований.

На втором этапе оценивали влияние числа промывок на содержание гемицеллюлоз и золы в осадке. Для этого осадок гемицеллюлоз делили на 9 проб: 1 исходную и 8 опытных. Исходную пробу не обрабатывали; опытные пробы промывали 70 % этанолом. Объем этанола для каждой промывки составлял 1/9 объема гемицеллюлозосодержащего экстракта, отобранного для анализа. Число промывок соответствовало порядковому номеру пробы. После завершения исследований в пробах определяли содержание гемицеллюлоз и золы.

На третьем этапе исследовали воздействие обработки целлюлозосодержащего концентрата растворами соляной кислоты на эффективность его очистки. Сначала полученный целлюлозосодержащий концентрат очищали от остатков гидроксида натрия, используемого для извлечения гемицеллюлоз. Для этого его смешивали с дистиллированной водой в соотношении 1:4 и доводили pH смеси до 7, добавляя 2 % раствор соляной кислоты. После смесь фильтровали; нейтрализованный целлюлозосодержащий концентрат (НЦК) использовали для исследований.

Предварительными исследованиями установлены и приняты в качестве постоянных следующие факторы, обеспечивающие оптимальный гидродинамический режим в системе «НЦК – раствор соляной кислоты»: температура процесса 60 °С; соотношение НЦК к раствору кислоты 1:4 и частота перемешивания 2 с⁻¹.

В качестве переменных факторов рассматривали: концентрацию соляной кислоты (X_2), %, в диапазоне

10–20 с шагом 5 и продолжительность процесса (Y_2), мин, в диапазоне 60–300 с шагом 120.

В качестве функций отклика приняты, %: Z_6 – содержание целлюлозы; Z_7 – содержание пектиновых веществ; Z_8 – содержание лигнина; Z_9 – содержание азотистых веществ; Z_{10} – содержание золы.

На четвертом этапе исследовали органолептические и физико-химические показатели качества получаемых целлюлозы и гемицеллюлоз.

Анализ химического состава ДДСЖ и получаемых из него целлюлозы и гемицеллюлоз проводили согласно общепринятым методам: массовую долю влаги определяли по ГОСТ 28561-90; массовую долю золы – по ГОСТ 25555.491; массовую долю белка – по ГОСТ 26889-86; массовую долю пектиновых веществ – по ГОСТ 29059-91; массовую долю целлюлозы и гемицеллюлоз – по методике А. И. Ермакова [40]; массовую долю лигнина – по ГОСТ 26177-84. Массовую долю пищевых волокон рассчитывали как сумму показателей массовой доли пектина, протопектина, лигнина, гемицеллюлоз и целлюлозы.

Анализ органолептических и физико-химических показателей качества целлюлозы осуществляли в сравнении с требованиями ГОСТ 32770-2014, гемицеллюлоз – в сравнении с требованиями ГОСТ 33310-2015.

Опыты проводили в двух повторениях, полученные данные усредняли. Диапазон допустимых значений содержания компонентов в ДДСЖ и получаемых из него продуктах рассчитывали на основе среднеквадратичных отклонений. Если величина среднеквадратичного отклонения не превышала погрешность метода анализа, то в качестве отклонения использовали значения этой погрешности.

Статистическую обработку экспериментальных данных выполняли с помощью программ Microsoft Office Excel 2019 и Statsoft Statistica 13.5.

Результаты и их обсуждение

В таблице 1 приведен химический состав делигнифицированного свекловичного жома (ДДСЖ), полученного по ранее разработанной технологии.

Таблица 1. Химический состав делигнифицированного свекловичного жома, % к массе сухих веществ

Table 1. Chemical composition of delignified sugar beet pulp, % solids

Показатель	Значение
Целлюлоза	49,61 ± 2,48
Гемицеллюлозы	31,18 ± 1,56
Балластные вещества, в т. ч.:	19,21
протопектин	3,29 ± 0,16
пектин	1,32 ± 0,07
лигнин	0,12 ± 0,01
Азотистые вещества, в т. ч.:	6,58
белкового происхождения	3,95 ± 0,20
небелкового происхождения	2,63 ± 0,13
Зола	7,90 ± 0,39

Наиболее эффективным способом извлечения гемицеллюлоз из растительного сырья является щелочная экстракция, позволяющая выделить гемицеллюлозы в форме солей с минимальным переходом балластных веществ в экстракт. На данном этапе извлечение гемицеллюлоз проводили из ДДСЖ, где количество балластных компонентов минимально.

Учитывая это, концентрация щелочи в экстрагенте должна быть достаточно низкой для обеспечения контролируемого процесса. Для перехода гемицеллюлоз в нерастворимое состояние необходимо протекание

реакций щелочи с карбоксильными и фенольными группами гемицеллюлоз. Одновременно с этими реакциями протекают реакции щелочи с ацетильными группами, что наоборот повышает растворимость гемицеллюлоз в воде.

Для выявления концентрации гидроксида натрия и продолжительности процесса при обработке ДДСЖ на химический состав гемицеллюлоз проведены исследования с последующей математической обработкой данных. В результате получены квадратичные зависимости (рис. 2).

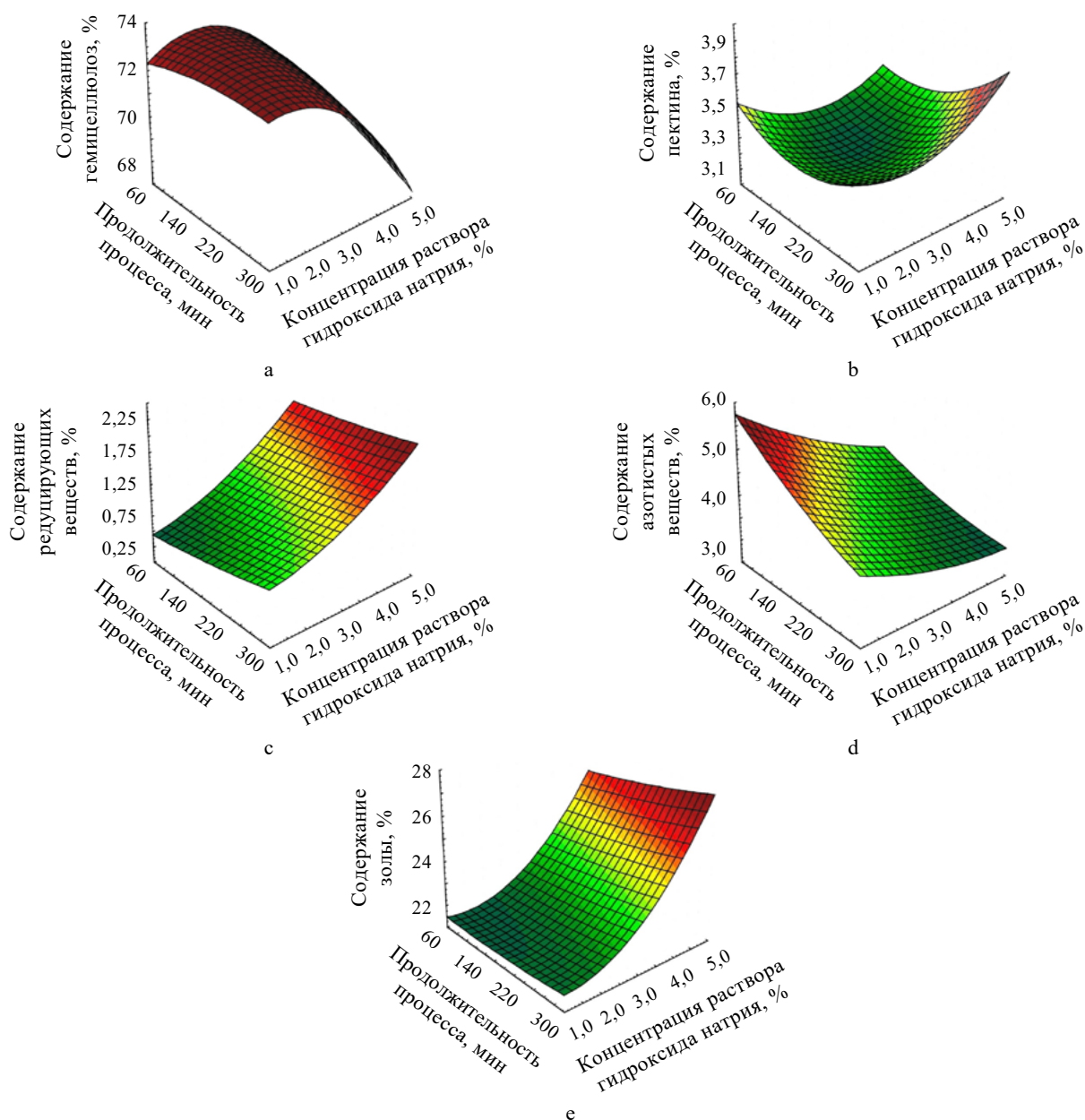


Рисунок 2. Влияние концентрации гидроксида натрия и продолжительности процесса при обработке ДДСЖ на химический состав гемицеллюлоз: а – содержание гемицеллюлоз; б – содержание пектина; с – содержание редуцирующих веществ; д – содержание азотистых веществ; е – содержание золы

Figure 2. Effect of sodium hydroxide concentration and process time on chemical composition of hemicellulose: а – hemicellulose; б – pectin; с – reducing substances; д – nitrogenous substances; and е – ash content

Анализ рисунка 2а показал, что максимальное содержание гемицеллюлоз наблюдается в диапазоне концентрации раствора гидроксида натрия 1,5–3,0 %. При концентрации менее 1,5 % образование нерастворимых солей гемицеллюлоз и их выделение в осадок протекало неинтенсивно; при концентрации более 3,0 %, наряду с образованием нерастворимых солей, происходил щелочной гидролиз гемицеллюлоз.

По результатам математической обработки экспериментальных данных получено уравнение (1), описывающее влияние концентраций гидроксида натрия и продолжительности процесса при обработке ДДСЖ на содержание гемицеллюлоз:

$$Z_1 = 70,03 + 2,14 \times X_1 + 0,014 \times Y_1 - 0,46 \times X_1^2 - 0,003 \times X_1 \times Y_1 - 2,13 \times 10^{-5} \times Y_1^2 \quad (1)$$

Для оценки адекватности полученного уравнения проведен анализ качества аппроксимации, проверка статистической значимости коэффициентов и верификация статистических предпосылок.

Коэффициент детерминации R^2 составил 0,988, что свидетельствует о высоком соответствии модели экспериментальным данным. Скорректированный коэффициент детерминации $R^2_{\text{скор.}}$ соответствовал 0,967, что также подтверждает адекватность модели. В таблице 2 приведена статистическая значимость коэффициентов уравнения (1).

Из данных, представленных в таблице 2, следует, что наиболее существенное влияние на выходную переменную оказывают факторы X_1 ; X_1^2 и $X_1 \times Y_1$. Вклад факторов Y_1 и Y_1^2 статистически незначим. Однако их исключение из модели для упрощения приводило к существенному снижению значений коэффициента детерминации и скорректированного коэффициента детерминации, поэтому в итоговом уравнении эти факторы сохранены.

По результатам расчета F -критерия Фишера, составившего 47,46 при $p = 0,0047$, установлено, что совокупное влияние факторов статистически значимо. Полученные данные позволяют признать математическое уравнение адекватным.

Оптимизация уравнения 1 показала, что максимальное содержание гемицеллюлоз, составляющее 70,27 %,

обеспечивается при концентрации гидроксида натрия 1,61 % и продолжительности процесса 3,55 ч.

Анализ рисунка 2б свидетельствует, что совместно с гемицеллюлозами из ДДСЖ извлекается и пектин. Оба соединения являются гидроколлоидами, и механизм их извлечения идентичный. При этом максимальное количество пектина извлекается в диапазоне концентрации гидроксида натрия 2,0–4,0 %. При концентрации менее 1,5 % образование нерастворимых солей пектина и их выделение в осадок протекает неинтенсивно; при концентрации более 4,0 %, наряду с образованием нерастворимых солей, происходит щелочной гидролиз пектина.

По результатам математической обработки экспериментальных данных получено уравнение (2), описывающее влияние концентрации гидроксида натрия и продолжительности процесса при обработке ДДСЖ на содержание пектина:

$$Z_2 = 3,99 + 0,33 \times X_1 + 0,004 \times Y_1 - 0,044 \times X_1^2 - 0,0004 \times X_1 \times Y_1 - 1,04 \times 10^{-5} \times Y_1^2 \quad (2)$$

Для оценки качества полученного уравнения проведена оценка качества аппроксимации, статистической значимости коэффициентов и проверка статистических предпосылок.

Коэффициент детерминации R^2 составил 0,863, что свидетельствует о соответствии модели экспериментальным данным. Скорректированный коэффициент детерминации равный 0,634 указывает на среднее качество аппроксимации.

В таблице 3 приведена статистическая значимость коэффициентов уравнения (2).

Данные таблицы 3 показывают, что наибольшее влияние на выходную переменную оказывают факторы X_1 и X_1^2 . Вклад факторов $X_1 \times Y_1$; Y_1 и Y_1^2 статистически незначим. Но их исключение из модели для упрощения приводило к существенному снижению значений коэффициента детерминации, поэтому в итоговом уравнении эти факторы сохранены.

Расчет F -критерия Фишера, который составлял 3,77 при $p = 0,152$, показал, что модель не является статистически значимой на уровне 5 %. Следовательно, математическое уравнение нельзя признать адекват-

Таблица 2. Статистическая значимость коэффициентов уравнения (1)

Table 2. Statistical significance of coefficients: Equation (1)

Переменная	Коэффициент	t -статистика	p -значение	Интерпретация
Константа	70,03	79,31	0,00	значима
X_1	2,14	4,57	0,02	значима
Y_1	0,014	1,84	0,163	незначима
X_1^2	–0,46	–6,30	0,008	значима
$X_1 \times Y_1$	–0,003	–3,46	0,041	значима
Y_1^2	$-2,13 \times 10^{-5}$	–1,06	0,368	незначима

Таблица 3. Статистическая значимость коэффициентов уравнения (2)

Table 3. Statistical significance of coefficients: Equation (2)

Переменная	Коэффициент	<i>t</i> -статистика	<i>p</i> -значение	Интерпретация
Константа	3,99	17,10	0,00	значима
X_1	−0,33	−2,62	0,079	погранично значима (при $\alpha = 0,1$)
Y_1	−0,004	−2,01	0,139	незначима
X_1^2	0,044	2,28	0,107	погранично значима
$X_1 \times Y_1$	0,0004	1,89	0,155	незначима
Y_1^2	$1,04 \times 10^{-5}$	1,96	0,145	незначима

ным, несмотря на наличие относительно высокого коэффициента детерминации.

Процесс попутного извлечения пектина при щелочном извлечении гемицеллюлоз требует проведения более глубоких исследований. Для получения гемицеллюлоз высокой чистоты из свекловичного жома на ранней стадии необходимо добиться максимального удаления сопутствующих гемицеллюлозе гидроколлоидов, чтобы их остаточное содержание в ДДСЖ было минимальным.

Из рисунка 2с видно, что с ростом концентрации раствора гидроксида натрия и продолжительности процесса повышается содержание редуцирующих веществ и снижается содержание гемицеллюлоз. Эта обратная зависимость подтверждает предположение о гидролизе гемицеллюлоз.

Согласно данным, которые представлены на рисунке 2(d, e), с увеличением концентрации раствора гидроксида натрия и продолжительности обработки содержание азотистых веществ снижается, в то время как содержание золы увеличивается. Это обусловлено щелочным разложением азотистых веществ и образованием нерастворимых солей из продуктов щелочного гидролиза гемицеллюлоз, пектина, редуцирующих веществ и азотистых веществ.

В связи с непостоянным химическим составом получаемого в производственных условиях свекловичного жома, в качестве рациональных параметров извлечения гемицеллюлоз и ДДСЖ приняты: концентрация раствора гидроксида натрия 2,0 %; продолжительность процесса 3,0 ч; температура 25 °С.

По указанным технологическим режимам получены гемицеллюлозы, химический состав которых приведен в таблице 4.

Суммарное содержание целевых компонентов (гемицеллюлоз, пектина и редуцирующих веществ) в полученном продукте составляет 74,0 %, что формально соответствует минимальному требованию ГОСТ 33310-2015 для содержания углеводов (более 74,0 %). Однако для обеспечения стабильного соответствия стандарту и повышения чистоты продукта необходимо увеличить долю гемицеллюлоз. Основной примесью, снижающей чистоту продукта, является зола, поэтому для повышения содержания гемицеллюлоз выше 74,0 %

Таблица 4. Химический состав гемицеллюлоз, % к массе сухих веществ

Table 4. Chemical composition of hemicellulose, % solids

Показатель	Значение
Гемицеллюлозы	$69,40 \pm 3,47$
Балластные вещества, в т. ч.:	30,60
пектин	$3,80 \pm 0,20$
редуцирующие вещества	$0,80 \pm 0,05$
Азотистые вещества, в т. ч.:	4,57
белкового происхождения	$3,00 \pm 0,10$
небелкового происхождения	$1,55 \pm 0,10$
Зола	$21,45 \pm 1,00$

необходимо снизить зольность продукта. Для этого возможно использование диализа, ионного обмена, ультрафильтрации, промывания спиртом и водой. Наиболее аппаратуро- и ресурсоемким методом выступает промывание спиртом. В связи с этим изучено влияние кратности промывки фильтрационного осадка, полученного после осаждения гемицеллюлоз из экстракта, на их конечное содержание и зольность.

На рисунке 3 представлены графики влияния кратности промывки фильтрационного осадка на содержание гемицеллюлоз и золы. Из представленных данных следует, что содержание гемицеллюлоз выше 74,0 % обеспечивается при двукратной промывке 70 % этанолом. Полученный целлюлозосодержащий концентрат нейтрализовали и использовали в дальнейших исследованиях.

В таблице 5 приведен химический состав нейтрализованного целлюлозосодержащего концентрата (НЦК). Анализ данных показывает, что для получения целлюлозы из НЦК необходимо удалить балластные вещества, доля органических соединений которых составляет около 80 %. Для очистки целлюлозы от подобных веществ наиболее эффективно применяют растворы соляной кислоты, поскольку она не нарушает структуру целлюлозных волокон.

Цель данного этапа работы заключалась в определении влияния концентрации соляной кислоты и продолжительности обработки НЦК на химический состав получаемой целлюлозы. Исследования включали мате-

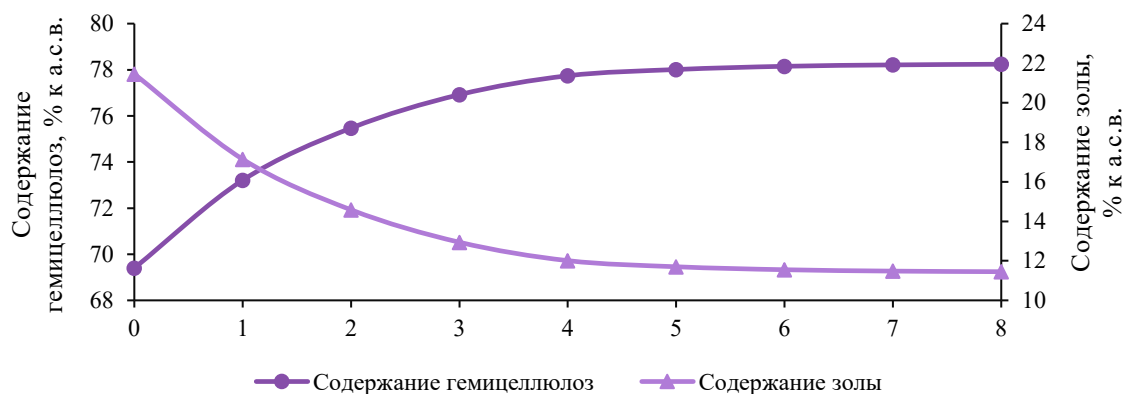


Рисунок 3. Влияние кратности промывки фильтрационного осадка на содержание гемицеллюлозы и золы

Figure 3. Effect of filter cake washing frequency on hemicellulose and ash

Таблица 5. Химический состав нейтрализованного целлюлозосодержащего концентрата, % к массе сухих веществ

Table 5. Chemical composition of neutralized cellulose concentrate, % solids

Показатель	Значение
Целлюлоза	78,70 ± 3,90
Балластные вещества, в т. ч.:	21,30
гемицеллюлозы	7,35 ± 0,37
пектиновые вещества	4,83 ± 0,24
лигнин	0,35 ± 0,05
Азотистые вещества, в т. ч.:	7,70
белкового происхождения	4,55 ± 0,10
небелкового происхождения	3,15 ± 0,10
Зола	1,07 ± 0,05

математическую обработку данных, в результате которой получены квадратические зависимости, представленные на рисунке 4. Анализ рисунка 4а показывает, что с повышением концентрации раствора соляной кислоты и продолжительности процесса содержание целлюлозы пропорционально возрастает. Для достижения требуемой ГОСТ 32770-2014 чистоты целлюлозы в порошке не менее 92,0 % необходимо подобрать оптимальные значения этих двух параметров.

По результатам математической обработки экспериментальных данных получено уравнение (3), описывающее влияние концентрации раствора соляной кислоты и продолжительности процесса при обработке НЦК на содержание целлюлозы:

$$Z_6 = 69,78 + 1,05 \times X_2 + 0,024 \times Y_2 - 0,0067 \times X_2^2 + 0,0012 \times X_2 \times Y_2 - 4,8 \times 10^{-5} \times Y_2^2 \quad (3)$$

Качество полученного уравнения оценивали по точности аппроксимации, статистической значимости коэффициентов и выполнению статистических предположений.

Коэффициент детерминации R^2 составил 0,999, что указывает на высокую точность соответствия модели экспериментальным данным. Скорректированный коэффициент детерминации $R^2_{\text{с.к.}} = 0,997$, что свидетельствует о высокой адекватности модели.

В таблице 6 приведена статистическая значимость коэффициентов уравнения (3). Наибольшее влияние на выходную переменную оказывают факторы X_2 ; Y_2 и $X_1 \times Y_1$. Вклад фактора X_1^2 статистически незначим; вклад фактора Y_2^2 – погранично значим. Редукция модели за счет их исключения приводила к существенному снижению коэффициентов детерминации (R^2 ; $R^2_{\text{с.к.}}$), поэтому в конечном уравнении эти факторы сохранены.

Рассчитанное значение F -критерия Фишера составило 466,9 при $p = 0,000156$, что свидетельствует о статистической значимости модели, подтверждая ее адекватность.

Для оптимизации процесса по уравнению (3) в качестве ограничений заданы: содержание целлюлозы не менее 92,01 % (по ГОСТ 32770-2014), концентрация соляной кислоты в диапазоне 10–20 % с шагом 2,5 %; продолжительность процесса – от 60 до 300 мин (в соответствии с экспериментальным планом).

Решение задачи оптимизации показало, что требуемая чистота целлюлозы (92,01 %) достигается при концентрациях соляной кислоты 15,0; 17,5 и 20,0 % с продолжительностью процесса 284; 162 и 94 мин соответственно. При концентрациях 10,0 и 12,5 % в заданном временном интервале решений не найдено. Дополнительный анализ выявил теоретический минимум расхода реагента: концентрация 14,23 % при времени обработки 7,06 ч. С экономической точки зрения из практически реализуемых вариантов оптимальными выбраны параметры: концентрация соляной кислоты 15,0 % и время 4,74 ч.

Содержание пектиновых и азотистых веществ снижается с увеличением концентрации раствора соляной кислоты и продолжительности обработки

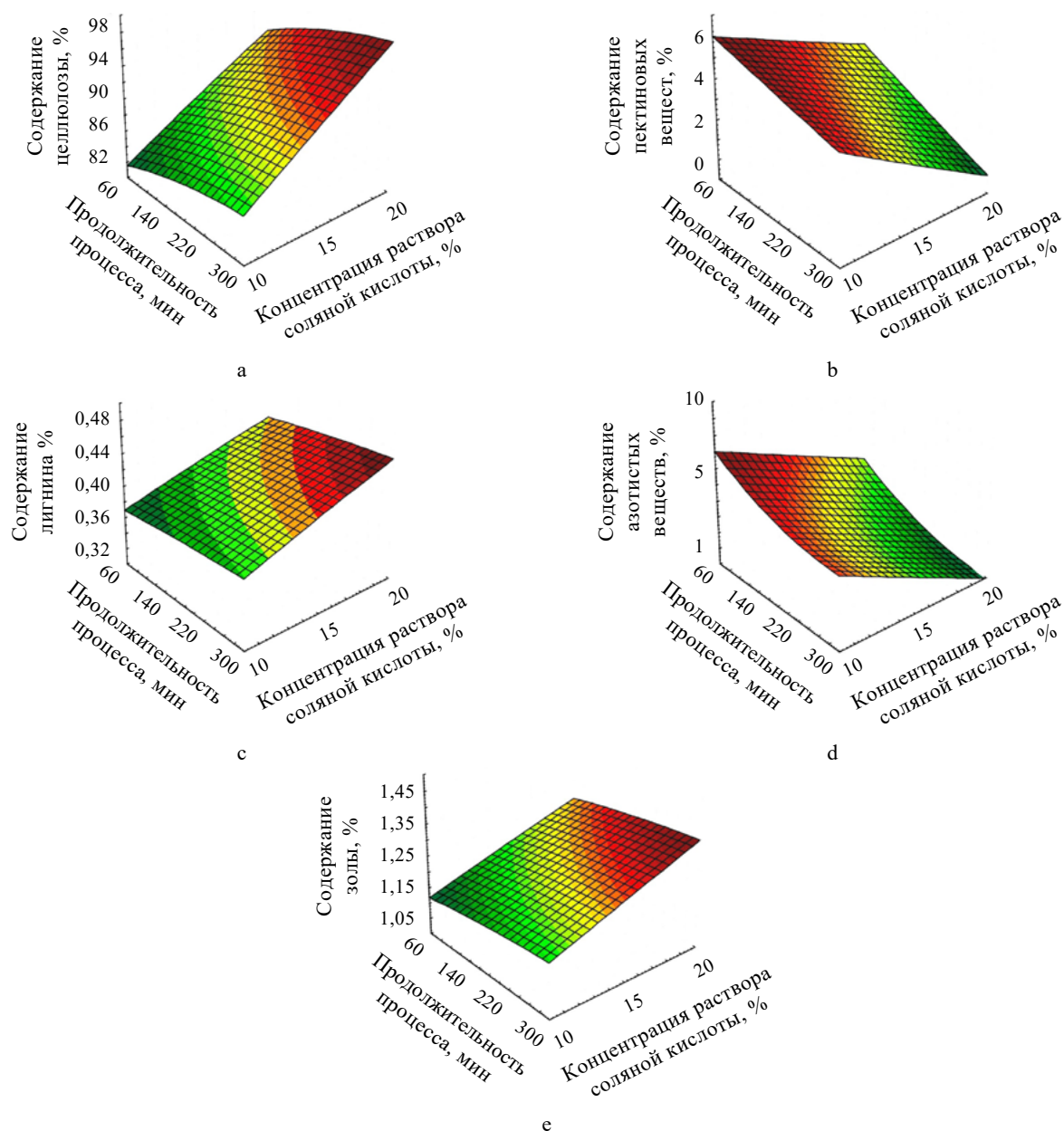


Рисунок 4. Влияние концентрации соляной кислоты и продолжительности процесса при обработке НЦК на химический состав целлюлозы: а – содержание целлюлозы; б – содержание пектиновых веществ; с – содержание лигнина; д – содержание азотистых веществ; е – содержание золы

Figure 4. Effect of hydrochloric acid concentration and processing time on chemical composition of cellulose: a – cellulose; b – pectin; c – lignin; d – nitrogenous substances; and e – ash

Таблица 6. Статистическая значимость коэффициентов уравнения (3)

Table 6. Statistical significance of coefficients: Equation (3)

Переменная	Коэффициент	<i>t</i> -статистика	<i>p</i> -значение	Интерпретация
Константа	69,78	33,79	0,00	значима
X_2	1,05	3,85	0,031	значима
Y_2	0,024	3,44	0,041	значима
X_2^2	–0,0067	–0,75	0,508	незначима
$X_2 \times Y_2$	0,0012	4,76	0,018	значима
Y_2^2	$-4,8 \times 10^{-5}$	–3,11	0,053	погранично значима

(рис. 4b, d), что подтверждает эффективность соляной кислоты для гидролиза балластных компонентов НЦК.

С повышением концентрации раствора соляной кислоты и продолжительности процесса пропорционально повышается содержание лигнина и золы (рис. 4с, е). Графики имеют незначительный положительный наклон, так как содержание лигнина и золы повышается за счет увеличения их доли в химическом составе целлюлозы. Гидролиз лигнина протекает медленнее; зольность увеличивается за счет образования нерастворимых солей. Однако основной причиной роста их процентного содержания является быстрое удаление пектинов и азотистых веществ, что приводит к относительному концентрированию лигнина и золы в оставшейся массе продукта.

Таким образом, в качестве рациональных режимов очистки НЦК были приняты: концентрация раствора соляной кислоты 15,0 %; продолжительность 5,0 ч; температура 60 °С.

Для оценки корректности всей разработанной технологической схемы получены целлюлоза и гемицеллюлозы; исследованы их органолептические и физико-химические показатели качества в сравнении с требованиями ГОСТ 32770-2014 для целлюлозы в порошке Е460 (ii) и ГОСТ 33310-2015 для гемицеллюлоз сои Е426 (табл. 7).

Целлюлоза и гемицеллюлозы, полученные по разработанной технологии, не соответствуют требованиям ГОСТ по признаку сырьевого происхождения. Требования ГОСТ 32770-2014 и ГОСТ 33310-2015 регламентируют незначительное количество показателей для пищевых добавок, которые используют в качестве эмульгаторов и загустителей, поэтому оценивать возможность применения свекловичных целлюлозы и гемицеллюлоз только по требованиям стандартов нерационально.

Более подробным нормативным документом с точки зрения предъявляемых требований к качеству пищевых добавок является Регламент № 231/2012 Европейской комиссии, устанавливающий спецификации для пищевых добавок, указанных в приложениях II и III к Регламенту (ЕС) 1333/2008 Европейского парламента и Совета ЕС (в редакции от 27 апреля 2025 г.). Данный

регламент предъявляет ряд показателей к гемицеллюлозам сои Е426 и порошковой целлюлозе Е460 (ii), которые отсутствуют в ГОСТ 32770-2014 и ГОСТ 33310-2015, ТР ТС 021/2011 и ТР ТС 029/2012.

Регламент № 231/2012 не предъявляет требований к происхождению порошкообразной целлюлозы – она может быть получена из любого волокнистого растительного материала. В требованиях к качеству целлюлозы обозначены: минимальный размер частиц, растворимость, тест суспензии, значение pH суспензии, потери при сушке, содержание водорастворимых примесей, сульфатной золы, крахмала.

ТР ТС Регламент № 231/2012, аналогично ГОСТ 33310-2015, в качестве сырья для гемицеллюлоз предполагает исключительно сою, а в качестве осадителя допускает только этанол. В требованиях к качеству гемицеллюлоз обозначены: растворимость, значение pH 1 % раствора, потери при сушке, содержание белка, вязкость 10 % раствора, содержание золы и этанола.

Наряду с ТР ТС 029/2012 Регламент № 231/2012 устанавливает предельно допустимые уровни содержания мышьяка, свинца, ртути и кадмия; микробиологические показатели безопасности в целлюлозе и гемицеллюлозах. При этом он не содержит требований к содержанию цезия-137 и стронция-90, уровни которых в ЕС регулируются отдельными радиационными актами и международными стандартами.

Проведенный комплекс исследований позволяет сделать вывод о возможности получения целлюлозы и гемицеллюлоз из свекловичного жома, соответствующих по своим органолептическим и физико-химическим показателям требованиям ГОСТ.

Для практического применения свекловичных целлюлозы и гемицеллюлоз в качестве пищевых добавок необходимы дополнительные исследования их ключевых технологических свойств: эмульгирующей и влагоудерживающей способности. Также требуется разработка и внедрение нормативной документации, устанавливающей требования к качеству и безопасности свекловичных целлюлозы и гемицеллюлоз, которая бы учитывала как положения российского законодательства, так и отдельные показатели, регламентированные зарубежными нормативными актами.

Таблица 7. Органолептические и физико-химические показатели качества целлюлозы и гемицеллюлоз

Table 7. Sensory and physicochemical quality indicators of cellulose and hemicellulose

Показатель	Целлюлоза		Гемицеллюлозы	
	Характеристика / значение	Требования ГОСТ 32770-2014	Характеристика / значение	Требования ГОСТ 33310-2015
Внешний вид	сыпучий порошок	сыпучий порошок	сыпучий порошок	сыпучий порошок
Цвет	белый	белый	желто-белый	белый или желто-белый
Содержание целлюлозы, %	92,5	не менее 92,0	76,2	не менее 74,0
Происхождение	свекловичная	древесная или хлопковая	свекловичные	соевые

Выводы

Проведенные исследования подтвердили перспективность применения депектинизированного и делигнифицированного свекловичного жома в качестве сырья для получения гемицеллюлоз и целлюлозы. Установлены эффективные режимы извлечения гемицеллюлоз: концентрация раствора гидроксида натрия – 2,0 %, продолжительность процесса 3,0 ч, температура 25 °С. Требуемая степень чистоты извлекаемых гемицеллюлоз обеспечивается при их последующей двукратной промывке от балластных веществ 70 % этанолом. Определены оптимальные параметры получения целлюлозы: концентрация раствора соляной кислоты 15,0 %, продолжительность процесса 5,0 ч, температура 60 °С.

Полученные продукты соответствуют требованиям ГОСТ по органолептическим и физико-химическим показателям. Однако для их применения в пищевой промышленности необходимо разработать нормативную документацию, устанавливающую требования к качеству и безопасности свекловичных гемицеллюлоз и целлюлоз.

Критерии авторства

С. О. Семенихин – разработка концепции работы; постановка цели и задач исследования; руководство процессом выполнения этапов работы; интерпретация полученных экспериментальных данных и написание рукописи статьи. А. А. Фабрицкая и Н. М. Даишева – проведение экспериментальных исследований и первичная обработка полученных данных.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution

S.O. Semenikhin developed the research concept, set the research objectives, supervised the project, interpreted the results, and wrote the manuscript. A.A. Fabritskaya and N.M. Daisheva conducted the experimental studies and processed the obtained data.

Conflict of interest

The authors state that there is no conflict of interest.

Список литературы / References

1. Захарова Л. М., Абушахманова Л. В. Исследование технологических особенностей производства сливочного масла пониженной жирности. *Техника и технология пищевых производств*. 2019. Т. 49. № 2. С. 209–215. [Zakharova LM, Abushahmanova LV. Low-fat butter: Production and technological features. *Food Processing: Techniques and Technology*. 2019;49(2):209–215. (In Russ.)] <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2019-2-209-215>
2. Иванова Г. В., Чесноков Н. В., Елисеенко Т. Г. Многокомпонентные рецептуры для специального питания. *Вестник КрасГАУ*. 2013. № 4. С. 176–179. [Ivanova GV, Chesnokov NV, Eliseenko TG. Multicomponent formulations for special nutrition. *Bulletin KSAU*. 2013;(4):176–179. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/PZBNMD>
3. Галушина П. С. Применение пищевых волокон в производстве мясных продуктов. Тенденции развития науки и образования. 2023. № 7. С. 206–208. [Galushina PS. Dietary fiber in meat production. *Trends in Science and Education*. 2023;(7):206–208. (In Russ.)] <https://doi.org/10.18411/trnio-11-2023-453>
4. Chen Y, Fu Q, Jin W, Shen W, Li J. Improving the quality of steamed rice bread using micro-cellulose as fillers: Effect of particle size. *Carbohydrate Polymers*. 2025;362:123663. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2025.123663>
5. Ren Y, Linter BR, Foster TJ. Starch replacement in gluten free bread by cellulose and fibrillated cellulose. *Food Hydrocolloids*. 2020;107:105957. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.105957>
6. Zhou L, Zhang W, Wang J. Recent advances in the study of modified cellulose in meat products: Modification method of cellulose, meat quality improvement and safety concern. *Trends in Food Science & Technology*. 2022;122:140–156. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2022.02.024>
7. Quijano L, Rodrigues R, Fischer D, Tovar-Castro JD, Payne A, *et al.* Bacterial cellulose cookbook: A systematic review on sustainable and cost-effective substrates. *Journal of Bioresources and Bioproducts*. 2024;9(4):379–409. <https://doi.org/10.1016/j.jobab.2024.05.003>
8. Пулатов Д. И. Роль пищевых волокон в профилактике и лечении хронического запора. *Проблемы гастроэнтерологии*. 2022. № 1. С. 43–50. [Pulatov DI. Dietary fiber in prevention and treatment of chronic constipation. *Issues of Gastroenterology*. 2022;(1):43–50. (In Russ.)]
9. Prabsangob N. Plant-based cellulose nanomaterials for food products with lowered energy uptake and improved nutritional value—a review. *NFS Journal*. 2023; 31:39–49. <https://doi.org/10.1016/j.nfs.2023.03.002>
10. He L, Guan Q-Q, Peng L-C, Chen K-L, Chai X-S. Improvement of alkali efficiency for purification of dissolving pulp by a modified cold caustic extraction process. *Carbohydrate Polymers*. 2017;178:412–417. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2017.09.085>
11. Царева М. А. О строении гемицеллюлозной составляющей клеточных стенок плодовоовощного сырья. *Химия растительного сырья*. № 1. С. 35–52. [Tsareva MA. Hemicellulose structure of cell walls in fruit and vegetable raw materials. *Chemistry of plant raw materials*. 2022;(1):35–52. (In Russ.)] <https://doi.org/10.14258/jcprm.2022019366>

12. Ottah VE, Ezugwu AL, Ezike TC, Chilaka FC. Comparative analysis of alkaline-extracted hemicelluloses from Beech, African rose and Agba woods using FTIR and HPLC. *Heliyon*. 2022;8(6):e09714. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09714>
13. Najjoun N, Grimi N, Benali M, Chadni M, Castignolles P. Extraction and chemical features of wood hemicelluloses: A review. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2025;311(4):143681. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.143681>
14. Kvikant M, Dax D, Toivakka M, Filonenko S, Xu C. Amphiphilic hemicellulose derivatives as stabilizers in oil-in-water emulsions. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2025;309(4):143094. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.143094>
15. Li S, Duan Y, Fang J, Chen S, Wang J, Jiang H, *et al.* Soybean hull hemicellulose–soybean protein isolate composite aerogel: Adsorption material for remediation of heavy metal-polluted water. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2025;310(2):143298. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.143298>
16. Иванов Ю. С., Никандров А. Б., Кузнецов А. Г. Производство сульфатной целлюлозы. Часть 1. СПб.: ВШТЭ СПбГУПТД, 2017. 77 с. [Ivanov YuS, Nikandrov AB, Kuznetsov AG. Sulfate cellulose production. Part 1. St. Petersburg: Higher School of Technical Engineering, St. Petersburg State University of Industrial Technologies and Design; 2017. 77 p. (In Russ.)]
17. Aldosari OF, Jabli M, Morad MH. Chemical extraction of cellulose from Ligno-cellulosic *Astragalus armatus* pods: Characterization, and application to the biosorption of methylene blue. *Arabian Journal of Chemistry*. 2023;16(6):105019. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2023.105019>
18. Wardhono E, Kustiningsih I, Yustanti E, Kurniawan B, Sukanto D, *et al.* Enhanced cellulose extraction from delignified oil palm empty fruit bunches using sequential ultrasound-microwave processing. *South African Journal of Chemical Engineering*. 2025;54:179–190. <https://doi.org/10.1016/j.sajce.2025.07.015>
19. Khan MN, Ahmad A, Rehman N, Kelestemur S, Tariq M, *et al.* Extraction and characterization of cellulose and cellulose nanocrystals from the stalks of *Marrubium vulgare* plant. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*. 2025;11:100947. <https://doi.org/10.1016/j.carpta.2025.100947>
20. Raza M, Abu-Jdayil B. Extraction of cellulose nanocrystals from date seeds using transition metal complex-assisted hydrochloric acid hydrolysis. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2025;294:139477. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.139477>
21. Judith R-BD, Pámanes-Carrasco GA, Delgado E, Rodríguez-Rosales MDJ, Medrano-Roldán H, *et al.* Extraction optimization and molecular dynamic simulation of cellulose nanocrystals obtained from bean forage. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*. 2022;43:102443. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2022.102443>
22. Macarez A-C, Maalej H, Drobek M, Pochat-Bohatier C, Maalej A, *et al.* From olive stones waste to valuable resource: Exploring various techniques for cellulose extraction. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2025;13(5):118204. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2025.118204>
23. Woldie WA, Shibeshi NT, Kuffi KD. Optimization of cellulose nanocrystals extraction from *teff* straw using acid hydrolysis followed by ultrasound sonication. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*. 2025;9:100707. <https://doi.org/10.1016/j.carpta.2025.100707>
24. Wulan PPDK, Ismojo, Khumaeroh, Syabila AN, Handayani AS, *et al.* Sustainable extraction of cellulose nanocrystals from empty palm oil bunches via low-acid hydrolysis. *Results in Engineering*. 2024;24:103012. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103012>
25. Bragagnolo FS, Santos PH, Funari CS, Rostagno MA, Exploring the potential of soy by-products: extraction strategies and bioactivity enhancement. *Current Opinion in Food Science*. 2025;64:101319. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2025.101319>
26. Hutterer C, Schild G, Potthast A. A precise study on effects that trigger alkaline hemicellulose extraction efficiency. *Bioresource Technology*. 2016;214:460–467. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.04.114>
27. Rodríguez-Sanz A, Fuciños C, Míguez M, Rúa ML, Torrado AM. Direct enzymatic hydrolysis of solid wheat straw with *endo*-xylanases: Effect of the temperature on the hemicellulose release and the product profile modulation. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2024;270(2):132211. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.132211>
28. Djalal M, Nafissa M, Mansour R, Jawaid M, Hocine M, Lamia B. Effect of alkali treatment on new lignocellulosic fibres from the stem of the *Aster squamatus* plant. *Journal of Materials Research and Technology*. 2024;32:2882–2890. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.08.104>
29. Zhang J, Wang Y-H, Qu Y-S, Wei Q-Y, Li H-Q. Effect of the organizational difference of corn stalk on hemicellulose extraction and enzymatic hydrolysis. *Industrial Crops and Products*. 2018;112:698–704. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.01.007>
30. Wang X, Liu Y, Luo S, Liu B, Yao S, *et al.* Structural characteristics of hemicelluloses and lignin-carbohydrate complexes in alkaline-extracted bamboo green, core, and yellow. *Journal of Bioresources and Bioproducts*. 2025;10(3):386–396. <https://doi.org/10.1016/j.jobab.2025.01.004>
31. Li H-Y, Sun S-N, Zhou X, Peng F, Sun R-C. Structural characterization of hemicelluloses and topochemical changes in *Eucalyptus* cell wall during alkali ethanol treatment. *Carbohydrate Polymers*. 2015;123:17–26. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2014.12.066>

32. Sun S-L, Wen J-L, Ma M-G, Sun R-C. Successive alkali extraction and structural characterization of hemicelluloses from sweet sorghum stem. *Carbohydrate Polymers*. 2013;92(2):2224–2231. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2012.11.098>
33. Грибкова И. Н., Харламова Л. Н., Севостианова Е. М., Лазарева И. В., Захаров М. А. и др. Извлечение органических соединений из отработанного пивного зерна различными методами. *Техника и технология пищевых производств*. 2022. Т. 52. № 3. С. 469–489. [Gribkova IN, Kharlamova LN, Sevostianova EM, Lazareva IV, Zakharov MA, *et al.* Extracting organic compounds from brewer's spent grain by various methods. *Food Processing: Techniques and Technology*. 2022;52(3):469–489. (In Russ.)] <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2022-3-2383>
34. Sun S-C, Sun D, Cao X-F. Effect of integrated treatment on enhancing the enzymatic hydrolysis of cocksfoot grass and the structural characteristics of co-produced hemicelluloses. *Biotechnology for Biofuels*. 2021;14(88). <https://doi.org/10.1186/s13068-021-01944-8>
35. Sabatini F, Maresca E, Aulitto M, Termopoli V, De Risi A, *et al.* Exploiting agri-food residues for kombucha tea and bacterial cellulose production. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2025;302:140293. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.140293>
36. Донченко Л. В. Свекловичный жом – стабильный промышленный источник пектина в России. *Сахар*. 2018. № 7. С. 46–49. [Donchenko LV. Beet pulp as a reliable industrial source of pectin in Russia. *Sugar*. 2018;7:46–49. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/XWFGPB>
37. Донченко Л. В., Ластков Д. О. Об актуальности глубокой переработки свекловичного жома в современных условиях. *Сахар*. 2023. №2. С. 40–45. [Donchenko LV, Lastkov DO. Advanced deep processing of beet pulp. *Sugar*. 2023;2:40–45. (In Russ.)] <https://doi.org/10.24412/2413-5518-2023-2-40-45>
38. Abou-Elseoud WS, Hassan EA, Hassan ML. Extraction of pectin from sugar beet pulp by enzymatic and ultrasound-assisted treatments. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*. 2021;2:100042. <https://doi.org/10.1016/j.carpta.2021.100042>
39. Abou-Elseoud WS, Abdel-karim AM, Hassan EA, Hassan ML. Enzyme- and acid-extracted sugar beet pectin as green corrosion inhibitors for mild steel in hydrochloric acid solution. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*. 2021;2:100072. <https://doi.org/10.1016/j.carpta.2021.100072>
40. Ермаков А. И. Методы биохимического исследования растений. Л.: Агропромиздат, 1987. 429 с. [Ermakov AI. Biochemical methods in plant research. Leningrad: Agropromizdat; 1987. 429 p (In Russ.)]

Дополнительная информация об авторах / Additional information about the authors

Семенихин Семен Олегович / Semyon O. Semenikhin ORCID 0000-0002-2038-0122; eLIBRARY SPIN 1048-7200
Фабрицкая Алла Андреевна / Alla A. Fabritskaya ORCID 0000-0001-9310-4543; eLIBRARY SPIN 3317-0628
Даишева Наиля Мидхатовна / Nailya M. Daisheva ORCID 0000-0002-5813-156X; eLIBRARY SPIN 4679-7994

<https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-1-2629>
<https://elibrary.ru/AUAXUF>

Оригинальная статья
<https://fptt.ru>

Влияние препарата Юнигель Плантум на физиологические параметры растений ячменя в условиях водного дефицита



Ф. К. Арипова^{1,2,*}, Е. Д. Данилова³, Е. В. Бойко³,
М. Кадырбаев⁴, А. И. Ражабов⁶, Г. А. Душанова⁶,
А. А. Дранников^{1,5,6}, Е. А. Литвинова^{1,6}

¹ Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

² Сибирский государственный университет инженерии и биотехнологий, Новосибирск, Россия

³ Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

⁴ Сибирский государственный медицинский университет, Томск, Россия

⁵ Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия

⁶ Самаркандский Государственный университет имени Шарофа Рашидова, Самарканд, Узбекистан

Поступила в редакцию: 26.11.2025

Принята после рецензирования: 29.12.2025

Принята к публикации: 13.01.2026

*e-mail: aripova@corp.nstu.ru

© Ф. К. Арипова, Е. Д. Данилова, Е. В. Бойко, М. Кадырбаев,
А. И. Ражабов, Г. А. Душанова, А. А. Дранников,
Е. А. Литвинова, 2026



Аннотация.

Ячмень (*Hordeum vulgare* L.) используется в качестве кормовой, продовольственной, технической и агротехнической культуры. Одним из стрессовых факторов в процессе роста и развития данной культуры является водный дефицит. Альтернативой уменьшения почвенной засухи, ограничивающей рост и продуктивность злаковых культур, выступают биопрепараты на основе хитозана. Цель исследования – оценка влияния биоорганического препарата Юнигель Плантум (на основе модифицированного хитозана) на устойчивость растений ячменя к последующему действию почвенной засухи при внесении в почву. Объект исследования – ячмень сорта Биом. В рамках работы проводили две серии опытов с применением удобрения Юнигель Плантум в 3 повторениях. Оценивали влияние биоудобрения Юнигель Плантум на энергию прорастания семян ячменя в оптимальных условиях выращивания, а также влияние препарата на повышение устойчивости растений ячменя к водному дефициту.

Применение биоудобрения способствовало улучшению водного статуса растений, снижению окислительного повреждения, регулированию накопления защитных метаболитов (антоцианов и пролина). Отмечено уменьшение негативного влияния водного стресса на фотосинтетическую систему за счет сохранения высокого уровня фотосинтетических пигментов. Использование гидрогелевых структур, которые входят в состав биоорганического препарата Юнигель Плантум, способствовало удерживанию воды в почве, повышая ее доступность для растений и снижая стрессовые воздействия. Совокупность положительных факторов повышает устойчивость ячменя к засухе и уменьшает повреждения, вызванные водным дефицитом.

Полученные результаты позволяют рекомендовать биопрепарат Юнигель Плантум для исследования в полевых условиях выращивания ячменя.

Ключевые слова. Ячмень, биоудобрение, водный дефицит, хитозан, метаболиты

Финансирование. Исследование выполнено в рамках Соглашения о предоставлении гранта в форме субсидий из областного бюджета Новосибирской области в соответствии с п. 4 статьи 78.1 Бюджетного кодекса РФ от 26.10.2023 № 0000005406995 99823 5121722/№ МЛ-3, заключенного между Министерством науки и инновационной политики Новосибирской области и НГТУ (проект Сиббионоц).

Для цитирования: Арипова Ф. К., Данилова Е. Д., Бойко Е. В., Кадырбаев М., Ражабов А. И., и др. Влияние препарата Юнигель Плантум на физиологические параметры растений ячменя в условиях водного дефицита. Техника и технология пищевых производств. 2026. Т. 56. № 1. С. 111–121. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-1-2629>

Effect of Unigel Plantum on Barley under Water Deficit



Farida K. Aripova^{1,2,*}, Elena D. Danilova³, Ekaterina V. Boyko³,
Maksat Kadyrbaev⁴, Asatillo I. Rajabov⁶, Gavhar A. Dushanova⁶,
Aleksandr A. Drannikov^{1,5,6}, Ekaterina A. Litvinova^{1,6}

¹ Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

² Siberian State University of Engineering and Biotechnology, Novosibirsk, Russia

³ Tomsk State University, Tomsk, Russia

⁴ Siberian State Medical University, Tomsk, Russia

⁵ Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

⁶ Samarkand State University, Samarkand, Uzbekistan

Received: 26.11.2025

Revised: 29.12.2025

Accepted: 13.01.2026

*e-mail: aripova@corp.nstu.ru

© F.K. Aripova, E.D. Danilova, E.V. Boyko, M. Kadyrbaev,
A.I. Rajabov, G.A. Dushanova, A.A. Drannikov, E.A. Litvinova, 2026



Abstract.

Barley (*Hordeum vulgare* L.) is a versatile crop utilized for food, feed, and industrial purposes; however, it remains highly sensitive to water stress. Chitosan-based biofertilizers reduce soil drought, thus improving the growth rate and yield of cereal crops. The article describes the effect of the chitosan biofertilizer Yunigel Plantum on barley resistance to soil drought.

The study involved the Biom barley variety subjected to two triplicated series of experiments with Yunigel Plantum. The experiments featured the effect of Yunigel Plantum on seed germination energy under optimal conditions, as well on drought resistance.

Yunigel Plantum improved the water status, reduced the oxidative damage, and stabilized the accumulation of such protective metabolites as anthocyanins and proline. The high levels of photosynthetic pigments reduced the negative impact of water stress on the photosynthetic system. Yunigel Plantum contained hydrogel structures that promoted water retention in the soil, making it more available to plants and reducing the stress. The synergy of these positive factors increased the drought resistance and reduced the damage caused by water deficiency.

In this research, Yunigel Plantum showed good prospects for field trials in the sphere of barley farming.

Keywords. Barley (*Hordeum vulgare* L.), biofertilizer, water deficiency, chitosan, metabolites

Funding. The work was carried out within the framework of the Agreement on the provision of a grant in the form of a subsidy from the regional budget of the Novosibirsk region in accordance with paragraph 4 of Article 78.1 of the Budget Code of the Russian Federation dated October 26, 2023 No. 000000540699599823 5121722/No. ML-3, concluded between the Ministry of Science and Innovation Policy of the Novosibirsk Region and NSTU (Sibbionoc project).

For citation: Aripova FK, Danilova ED, Boyko EV, Kadyrbaev M, Rajabov AI, et al. Effect of Unigel Plantum on Barley under Water Deficit. Food Processing: Techniques and Technology. 2026;56(1):111–121. (In Russ.) <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-1-2629>

Введение

Водный дефицит является одним из самых серьезных стрессовых факторов для растений, особенно для злаков, которые зависят от доступности влаги в почве для нормального физиологического функционирования. Недостаток воды приводит к снижению осмотического потенциала клеток – ключевого параметра, поддерживающего водный баланс и тургорное давление внутри растительных тканей. В результате осмотический потенциал становится отрицательным, что препятствует поступлению воды в клетки и вызывает обезвоживание, которое приводит к уменьшению размера клеток, снижению объема вакуолей и тургора.

Указанные процессы замедляют темпы роста растения и ухудшают развитие надземной части, что особенно критично в фазах активного формирования листьев, стеблей и колосьев у злаковых культур [1, 2].

Под воздействием водного дефицита в злаковых растениях значительно усиливается процесс перекисного окисления липидов клеточных мембран, что связано с активацией свободнорадикальных процессов, в ходе которых образуются реакционноспособные формы кислорода, повреждающие липидные компоненты мембран. Усиленное перекисное окисление приводит к потере структурной целостности клеточных мембран, ухудшая их барьерные и транспортные

функции. Повреждение мембран при водном дефиците сопровождается увеличением их проницаемости и оттоком K^+ из клеток; одновременно нарушение ионного гомеостаза затрагивает Ca^{2+} -зависимые сигнальные пути стресс-ответа [3–5]. В итоге повреждение мембран усиливает стрессовое состояние растения, вызывает деградацию и гибель клеток, что снижает общую устойчивость злаков к неблагоприятным условиям водного дефицита, что напрямую влияет на рост и продуктивность растений [6].

В ответ на водный дефицит растения накапливают пролин – аминокислоту, играющую роль осмопротектора, и антоцианы – флавоноидные пигменты, обладающие антиоксидантной активностью. Они помогают растениям регулировать осмотический потенциал, защищать клетки от повреждений, вызванных ионами активных форм кислорода (АФК), и способствуют адаптации к стрессовым условиям [7, 8].

Избыточная генерация АФК запускает перекисное окисление липидов в мембранах хлоропластов. Разрушение мембран повреждает структуру и функции тилакоидов, в которых сосредоточены фотосинтетические пигменты: происходит деградация хлорофиллов и каротиноидов, снижается их синтез, что ведет к уменьшению общего содержания пигментов и снижению фотосинтетической активности [9]. Проблема чрезмерной выработки АФК и окислительного стресса внутри тканей растения решается посредством применения хитозана, т. к. он способствует значительному увеличению содержания хлорофиллов в листьях. В результате улучшается фотосинтетическая активность и уровень поглощения энергии светом, позволяя растениям поддерживать более высокий уровень ассимиляции даже в условиях дефицита воды.

Хитозан – биополимер, проявляющий значительную эффективность в улучшении устойчивости растений к водному дефициту. Исследования, проведенные на различных злаковых культурах, продемонстрировали, что обработка растений хитозаном оказывает комплексное положительное воздействие на их физиологическое состояние и биохимические процессы. Применение хитозана способствует стимулированию прорастания семян, ускоряет развитие корневой и вегетативной систем, улучшает рост и устойчивость растений в условиях дефицита влаги. За счет этого хитозан становится перспективным биопрепаратом в агротехнологиях, направленным на повышение стрессоустойчивости культур [10–12]. Согласно отечественным исследованиям, препараты и композиции на основе биополимера хитозана и биологических агентов способны индуцировать устойчивость растений к различным стрессовым воздействиям, включая неблагоприятные абиотические факторы, путем активации защитных физиолого-биохимических механизмов [13, 14]. К числу биопрепаратов, содержащих в себе комплекс хитозана и органоминеральных веществ, способствующих росту и развитию растений,

относится биоудобрение Юнигель Плантам (Новосибирск, Россия). Данная форма биоудобрения представляет собой многофункциональный продукт на основе биополимера – модифицированного хитозана, обеспечивающего постепенное высвобождение в субстрат содержащихся в нем компонентов за счет своих физико-химических и биодеградиционных свойств [15]. В структурную матрицу данного природного полимера были иммобилизованы бактерии рода *Bacillus*, гуминовые и фульвовые кислоты (препарат Берес-8), микроэлементы. Ранее изучена эффективность применения препарата при выращивании листового салата [16].

Для исследования устойчивости к водному дефициту в качестве модельного растения выбран ячмень – культура, имеющая важное агрономическое значение и используемая в кормовых, продовольственных и технических целях. Действие хитозансодержащих препаратов на рост, фотосинтетический аппарат и антиоксидантную систему злаковых культур изучалось преимущественно на пшенице [17]. Вместе с тем экспериментальные данные, посвященные действию хитозансодержащих биопрепаратов на физиологическое состояние ячменя в условиях водного дефицита, в отечественной литературе представлены фрагментарно.

Цель исследования – оценка влияния биоорганического препарата Юнигель Плантам на выносливость растений ячменя к действию почвенной засухи при внесении в почву.

Объекты и методы исследования

Объект исследования – ячмень (*Hordeum vulgare* L.) сорта Биом, широко используемый в Сибири (Россия). Культура относится к зернофуражному направлению. Сорт среднеранний, его вегетационный период составляет 70–81 день. Колос растения имеет цилиндрическую форму, зерна крупные. Высота растений – 47–73 см. Сорт отличается высокой устойчивостью к полеганию. Зерно ячменя – ценный кормовой компонент для крупного рогатого скота, свиней и птиц за счет высокого содержания белка и питательности.

Проведено две серии опытов с применением биопрепарата Юнигель Плантам (Новосибирск, Россия) в 3 повторениях.

Первая серия опытов выполнена с целью исследования влияния биоудобрения Юнигель Плантам на энергию прорастания семян ячменя в оптимальных условиях выращивания. Энергия прорастания выступает показателем посевных качеств семян – процентом нормально проросших семян за определенный срок. В первой серии экспериментов сухие нестерильные семена ячменя высаживали в сосуды с субстратом, который состоял из почвенного субстрата, смешанного с торфом и песком в соотношении 7:2:1. Растения выращивали с использованием линейных LED-модулей полного спектра на диодах Samsung LM281B+ (плата 500×30 мм, угол 120°, CRI ≈ 80, IP33), питание 24 V DC. На полке 120×50 см уста-

навливали 3 планки на высоте ≈ 30 см над растениями. Номинальная мощность одной планки – 25–30 Вт. Интенсивность освещения рассчитывали по паспортной фотонной эффективности ($\approx 1,8$ мкмоль/Дж) и входной мощности: PPF ≈ 45 –54 мкмоль/с на планку, суммарно 135–162 мкмоль/с на полку. При площади полки 0,60 м² расчетное значение PPFD составляет ≈ 225 –270 мкмоль/(м²·с). При фотопериоде 16 ч DLI соответствует ≈ 13 –16 мкмоль/(м²·д). В каждом варианте было высажено 120 семян (12 сосудов по 10 семян ячменя). Контрольные варианты увлажняли дистиллированной водой. В почву опытных групп при посадке однократно вносили биоорганический препарат Юнигель Плантум в дозе 0,03 г на сосуд. Через неделю подсчитывали количество проросших семян, измеряли надземную массу проростков.

Во второй серии экспериментов изучали влияние препарата на повышение устойчивости растений ячменя к водному дефициту. Семена стерилизовали спиртовым раствором, 48 ч стратифицировали при температуре 4 °С для набухания семян и унифицирования их всхожести. Через 3 суток набухшие семена распределяли в сосуды с почвенным субстратом (смесь универсального грунта, перлита и песка в соотношении 7:2:1) согласно вариантам, отраженным на рисунке 1.

В каждом сосуде находилось по 30 семян с равным количеством субстрата. Высажено по пять сосудов на каждую группу. В группы «Юнигель Плантум» и «Юнигель Плантум + водный дефицит» в верхний слой субстрата вносили биоорганический препарат Юнигель Плантум в дозе 0,03 г на весь объем почвенного субстрата в каждом сосуде. В первые пять дней проростки во всех вариантах поливали дистиллированной водой одинаково. На 6 сутки полив водой в вариантах с водным дефицитом прекращали. Через 14 суток после переноса семян в сосудах с почвенным субстратом измеряли биомассу надземной части растений. Растительный материал для проведения биохимических методов анализа зафиксировали жидким азотом и хранили при –70 °С.

Гравиметрический анализ сырой и сухой биомассы растительного материала проводили с помощью ана-

литических весов Sartorius CP 622 (Германия). Сырую массу надземной части растений определяли после срезки образцов; сухую массу высушивали до достижения постоянной массы.

Величину перекисного окисления липидов измеряли спектрофотометрическим методом на мульти-модальном планшетном ридере (Feyond-A300, Allsheng, Китай) по концентрации соединений, активных в реакции с тиобарбитуровой кислотой при нагревании (ТБК-активных продуктов) по Y.A. Buege & S.D. Aust [18].

Содержание антоцианов определяли спектрофотометрическим методом [19]. Навеску растительного материала (0,3–0,5 г) измельчали и экстрагировали в 10 мл 1 % HCl при температуре 40–45 °С в течение 20 мин. После фильтрования измеряли оптическую плотность при 510 и 657 нм. Содержание антоцианов рассчитывали с учетом поправки на хлорофиллы и выражали в мкг/г сырого веса.

Определение содержания свободного пролина проводили по методу L.S. Bates *et al.* [20]. Для экстракции использовали 1,5 мл 3 % сульфосалициловой кислоты, реакцию с нингидриновым реактивом и уксусной кислотой проводили на водяной бане при 98 °С в течение 1 ч. Концентрацию пролина устанавливали по калибровочным растворам.

Клеточный сок получали растиранием материала с последующим центрифугированием (13000 g, 10 мин, 4 °С); надосадочную жидкость отбирали в микро-пробирки на льду. Осмотический потенциал, Мпа, экссудата измеряли на криоскопическом осмометре Osmomat 030 (Gonotec, Германия).

Концентрацию фотосинтетических пигментов в экстракте определяли по методу H. Lichtenthaler [21]: навеску листового материала массой 50 мг помещали в пробирку Эппендорфа, содержащую 1,5 мл 96 % этанола, затем перемешивали на вортексе и центрифугировали при 10000 g в течение 10 мин. Надосадочную жидкость переносили в отдельные стеклянные пробирки, повторяя экстракцию трижды, при этом все образцы хранили в темноте для предотвращения фотодеструкции пигментов. После этого объем спирта в каждой пробирке доводили до 5 мл, тщательно перемешивали

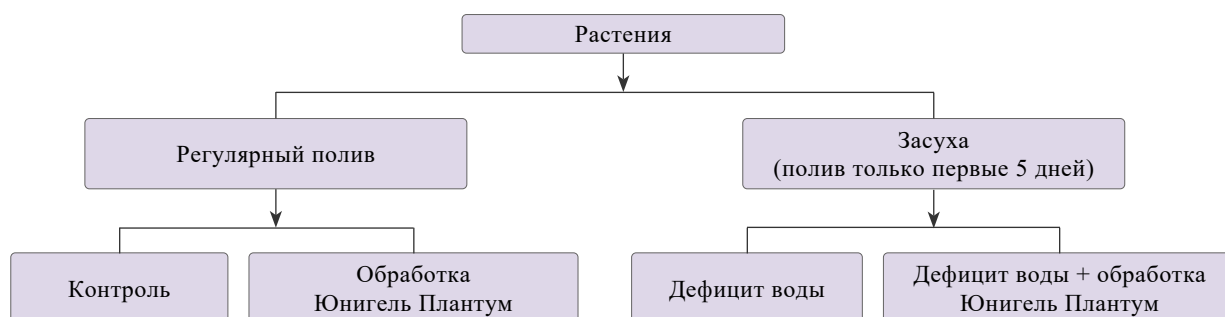


Рисунок 1. Схема второй серии экспериментов

Figure 1. Experiment series 2

и измеряли оптическую плотность полученных экстрактов спектрофотометрическим методом.

Результаты представлены как среднее и стандартная ошибка среднего. Статистическую обработку проводили в программе R версии 4.1.2 (R Foundation for Statistical Computing, Вена, Австрия) в среде RStudio. Для выявления различий между вариантами применяли дисперсионный анализ (ANOVA), после которого выполняли критерий Тьюки (Tukey's HSD) для множественных сравнений. Различия считали статистически значимыми при $p < 0,05$. Группы, имеющие достоверные отличия, обозначили символами * и #.

Результаты и их обсуждение

В первой серии экспериментов оценивали действие биоорганического препарата Юнигель Плантум на прорастание семян и рост проростков ячменя. Прорастание – важный этап в жизненном цикле культуры, от которого напрямую зависит полевая всхожесть. На ранних стадиях онтогенеза закладывается фундамент будущего урожая: формируются первичные корни и первые ассимилирующие органы, запускается метаболизм, обеспечивающий последующий рост и развитие. При недостатке влаги физиологические процессы замедляются, органы растения ингибируются.

В контрольном варианте для проростков ячменя средняя масса составила 0,168 г, что принято за 100 %. Применение препарата увеличило средний показатель на 14 % (t -критерий Стьюдента, где $n = 148$; $p = 0,02$). Кроме того, препарат Юнигель Плантум способствовал повышению лабораторной всхожести семян ячменя с 63 % (75 из 120) в контроле до 76 % (91 из 120) в опытном варианте (Хи-квадрат с поправкой Йейтса, где $X^2 = 4,36$; $p = 0,036$) (табл. 1). Таким образом, препарат обеспечил как прирост массы, так и возрастание всхожести ячменя.

Применение растворов хитозана – основного активного компонента, входящего в состав препарата Юнигель Плантум, – неоднократно изучалось в экспериментальных исследованиях. Ранее установлено, что хитозан стимулирует прорастание семян сельскохозяйственных культур. Этот эффект обусловлен стимулирующим действием хитозана на физиологические процессы прорастания семян, что запускает каскад биохимических реакций, способствующих более интенсивному развитию корневой системы и надземной массы. Эффективность хитозана была продемонстрирована на широком спектре культур, включая злаковые, пасленовые и бобовые, которые занимают ключевые позиции в сельскохозяйственном производстве [22, 23]. Применение биоорганического препарата с хитозаном представляет собой перспективный подход для устойчивого повышения продуктивности агрокультур и улучшения качества конечной продукции.

На следующем этапе выполнили комплексный анализ воздействия биоорганического препарата Юнигель Плантум на ключевые показатели роста и развития ячменя в норме и на фоне действия водного дефицита. Полученные данные свидетельствуют о негативном воздействии водного дефицита на рост ячменя, особенно выраженном в снижении сырой массы: с 0,864 г в контроле до 0,676 г при водном дефиците (табл. 2). Нехватка воды существенно тормозит общий рост растения через уменьшение клеточного тургора. Сырой массой является свежеобраный растительный материал, включающий воду и сухое вещество. Для ячменя этот показатель имеет разноплановое значение: от агрономического до экономического. С точки зрения агрономического значения показатель сырой массы ячменя является одним из индикаторов темпов роста, т. к. снижение сырой массы

Таблица 1. Влияние биоорганического препарата Юнигель Плантум на прорастание семян и рост ростков ячменя

Table 1. Effect of Unigel Planthum on barley seed germination and sprout growth

Вариант	Масса проростков, г	% от контроля	Количество проросших семян, шт	% от 120 семян
Контроль	0,168 ± 0,005	100	75	63
Юнигель Плантум	0,192 ± 0,009*	114	91*	76
* $p \leq 0,05$ Хи-квадрат			* $p \leq 0,05$ t -критерий Стьюдента	

Таблица 2. Влияние биоорганического препарата Юнигель Плантум на накопление биомассы растений ячменя и их оводненность в условиях водного дефицита

Table 2. Effect of Unigel Planthum on barley biomass and hydration under water stress

Вариант	Сырая масса, г	Сухая масса, г	Содержание воды, %
Контроль	0,864 ± 0,013	0,092 ± 0,002	89,0 ± 1,0
Юнигель Плантум	0,924 ± 0,024	0,107 ± 0,002	89,0 ± 2,0
Водный дефицит	0,676 ± 0,022*	0,084 ± 0,003	86,0 ± 1,0
Юнигель Плантум + водный дефицит	0,721 ± 0,026	0,081 ± 0,003	87,0 ± 0,5
* $p \leq 0,05$ по сравнению с контрольной группой			

на ранних фазах роста и развития говорит об отсутствии активного нарастания вегетативной массы и хорошем потенциале фотосинтеза. У проростков и молодых растений сырая масса корней коррелирует с их способностью поглощать воду и питательные вещества. Снижение сырой массы – один из показателей, связанных с урожайностью: на ранних стадиях сырая масса коррелирует с будущей биомассой зерна, т. к. интенсивное нарастание вегетативной части предшествует высокому урожаю, слабое – низкому.

Показатели сухой массы и содержания воды изменились, но статистически значимых различий не выявлено. При этом наблюдалась тенденция к снижению содержания воды в условиях водного дефицита, что подтверждает стрессовое состояние растений. Применение биоорганического препарата Юнигель Плантум на фоне водного дефицита способствовало ослаблению снижения: сырая масса составила 0,721 г.

При обработке препаратом без воздействия стрессовых факторов наблюдалось незначительное снижение содержания всех пигментов: хлорофилла *a* – до 1,3 мг/г свежей массы ячменя, хлорофилла *b* – до 0,4 мг/г, каротиноидов – до 0,2 мг/г. Результат свидетельствует об отсутствии выраженного стимулирующего эффекта препарата на синтез фотосинтетических пигментов в оптимальных условиях (рис. 2).

В условиях водного дефицита содержание всех пигментов значительно снизилось, отражая типичную реакцию растений на водный стресс, свидетельствующую о снижении фотосинтетической активности.

Комбинация обработки препаратом и водного дефицита сохранила содержание хлорофилла *a*, *b* и каротиноидов на уровне контрольных значений, что достоверно выше, чем в варианте с водным дефицитом без применения Юнигель Плантум.

В результате применение препарата в условиях водного дефицита способствовало поддержанию более высокого уровня фотосинтетических пигментов по сравнению с необработанными стрессовыми растениями, что свидетельствует о его потенциальной защитной роли в ослаблении повреждающего воздействия водного стресса на фотосинтетический аппарат. Аналогичные эффекты биопрепаратов и композиций, содержащих биологически активные компоненты, отмечены в отечественных исследованиях на злаковых культурах – преимущественно на примере пшеницы, где показано их влияние на состояние фотосинтетического аппарата и рост растений [17].

Водный стресс ограничивает рост за счет нарушения водообмена и клеточного тургора. Использование гидрогелевых структур, которые входят в состав биоорганического препарата Юнигель Плантум, помогает удерживать воду в почве, повышая ее доступность для растений и снижая стрессовые воздействия. Эти результаты подчеркивают перспективность применения биополимерных гелей в качестве агротехнического средства для повышения устойчивости ячменя к дефициту воды.

Для количественной оценки степени окислительного повреждения липидных мембран использовали метод определения количества тиобарбитуровой кислоты (ТБК-активные продукты) в реакции с пробами растений (рис. 3). ТБК-активными продуктами являются вещества, реагирующие с тиобарбитуровой кислотой. Их количественная оценка служит важным диагностическим инструментом в физиологии растений ячменя.

В контрольных условиях уровень ТБК-активных продуктов в надземной части растений ячменя составлял 0,026 мкг/г сырой массы. Водный дефицит

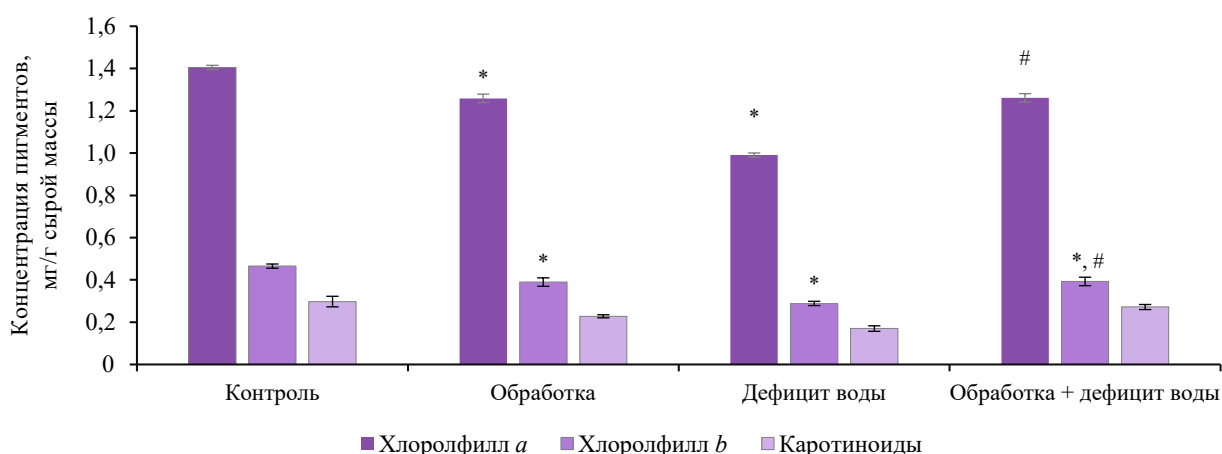


Рисунок 2. Влияние биоорганического препарата Юнигель Плантум на концентрацию фотосинтетических пигментов в листьях ячменя при водном дефиците (* $p \leq 0,05$ по сравнению с контрольной группой; # $p \leq 0,05$ по сравнению с группой с дефицитом воды)

Figure 2. Effect of Unigel Planthum on photosynthetic pigments in barley leaves under water stress (* $p < 0.05$ vs. control; # $p < 0.05$ vs. water-deficient group)

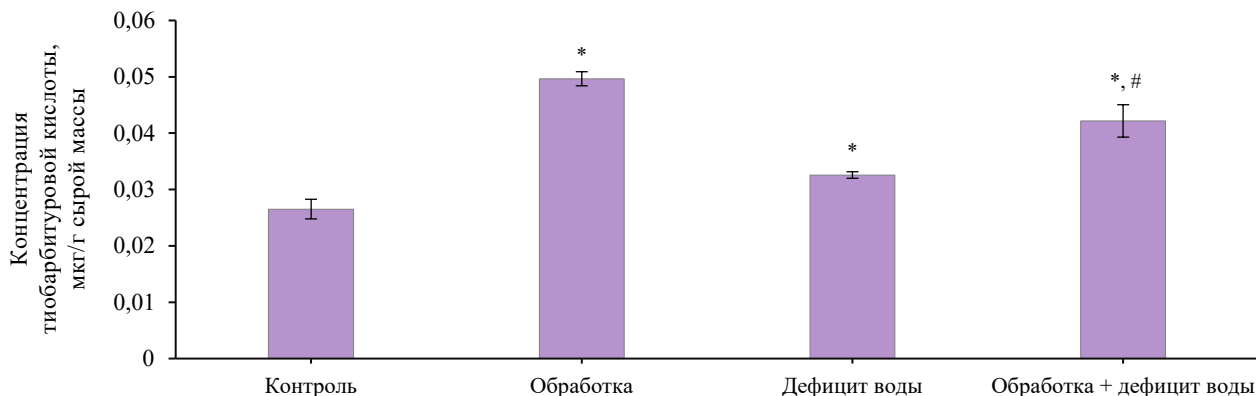


Рисунок 3. Влияние биоорганического препарата Юнигель Плантам на концентрацию тиобарбитуровой кислоты в растениях ячменя при водном дефиците (* $p \leq 0,05$ по сравнению с контрольной группой; # $p \leq 0,05$ по сравнению с группой с дефицитом воды)

Figure 3. Effect of Unigel Planthum on thiobarbituric acid in barley under water stress (* $p < 0.05$ vs. control; # $p < 0.05$ vs. water-deficient group)

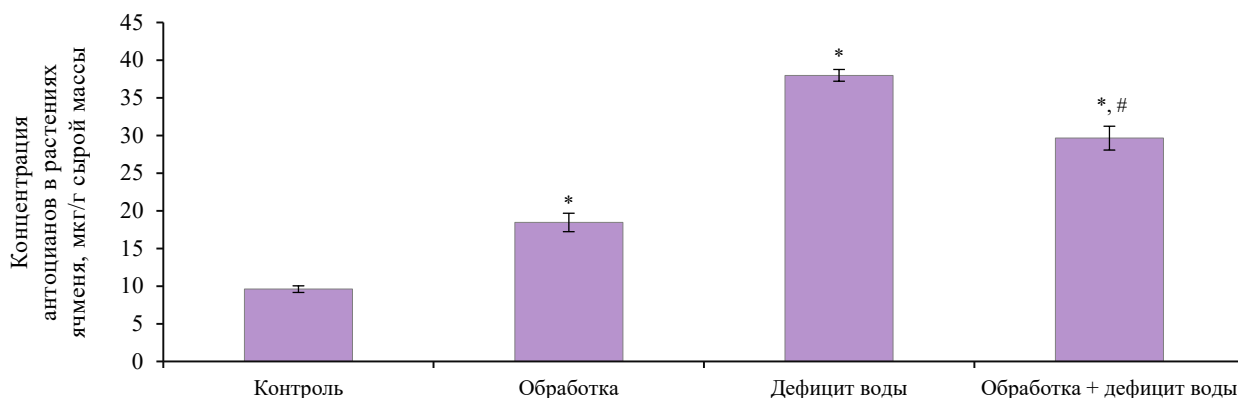


Рисунок 4. Влияние биоорганического препарата Юнигель Плантам на концентрацию антоцианов в растениях ячменя при водном дефиците (* $p \leq 0,05$ по сравнению с контрольной группой; # $p \leq 0,05$ по сравнению с группой с дефицитом воды)

Figure 4. Effect of Unigel Planthum on anthocyanins in barley under water stress (* $p < 0.05$ vs. control; # $p < 0.05$ vs. water-deficient group)

вызывал двукратное повышение содержания реактивных соединений тиобарбитуровой кислоты (TBARS) – группы соединений, образующихся в результате перекисного окисления липидов клеточных мембран относительно контрольных растений ячменя. Наличие в почвенном субстрате препарата Юнигель Плантам способствовало предотвращению развития окислительного стресса у ячменя в условиях водного дефицита (рис. 3).

При дефиците влаги содержание антоцианов в листьях культурных и диких видов растений значительно возрастает. Антоцианы действуют как антиоксиданты, нейтрализуя активные формы кислорода (АФК) – высокореакционные кислородсодержащие молекулы, образующиеся в клетках как побочные продукты метаболизма. Усиление биосинтеза антоцианов в условиях

дефицита воды является адаптивным ответом растений, направленным на повышение их выживаемости в неблагоприятных условиях окружающей среды.

В рамках эксперимента изучено влияние препарата Юнигель Плантам и водного дефицита на содержание антоцианов в надземной части растений ячменя. По результатам анализа, содержание антоцианов у контрольных растений составило 9,60 мкг/г сырой массы; при обработке препаратом без стресса – 18,45 мкг/г, прирост антоцианов составил более 90 % (рис. 4). При воздействии водного дефицита концентрация антоцианов выросла в 4,0 раза по сравнению с контролем, что соответствует литературным данным о реакции растений на водный стресс. В варианте «Юнигель Плантам + водный дефицит» уровень антоцианов был ниже, чем при одном водном дефиците. Внесение

препарата снижало острый стрессовый отклик ячменя по содержанию антоцианов при дефиците воды, что свидетельствует о частичном защитном действии препарата Юнигель Плантум.

Для поддержания водного баланса в тканях растений в условиях дефицита влаги критически важно снизить осмотический потенциал клеточного сока до уровня, восстанавливающего правильное направление градиента водного потенциала. Такое снижение обеспечивает возникновение отрицательного водного потенциала внутри клеток, что облегчает поступление воды из окружающей среды в клетки корня. Растения активируют внутренние адаптационные механизмы, направленные на увеличение концентрации растворенных веществ в апопластических и симпластических пространствах. Указанные изменения предотвращают дегидратацию клеток и поддерживают физиологические функции, обеспечивая устойчивость растений к засухе.

Согласно концепции индуцированной устойчивости, широко представленной в зарубежной и отечественной литературе, снижение избыточного накопления стресс-индикаторных метаболитов при применении биопрепаратов может свидетельствовать об ослаблении стрессового воздействия и более эффективной регуляции физиологического состояния растений [14].

В соответствии с полученными данными (рис. 5), осмотический потенциал клеточного экссудата листьев ячменя в контрольном варианте составил $-0,82$ МПа. Препарат Юнигель Плантум без стрессового воздействия не вызывал достоверных изменений осмотического потенциала, тогда как дефицит воды снижал осмотический потенциал относительно контроля. Препарат Юнигель Плантум в почве при водном дефиците не изменял величину осмотического потенциала клеточного сока листьев ячменя, по сравнению с растениями в условиях стресса, но без препарата.

Типичным и хорошо изученным ответом растений на воздействие различных стрессовых факторов (засуха, солевой стресс, высокая или низкая температура) является значительное накопление пролина – заменимой аминокислоты. Проллин в первую очередь действует как мощный осмопротектор, поддерживая осмотический баланс клеток и предотвращая обезвоживание при неблагоприятных условиях окружающей среды [23].

В отсутствие стрессового воздействия препарат Юнигель Плантум вызывал накопление пролина, что свидетельствует о его регуляторном влиянии на метаболические процессы – аналогично эффекту, наблюдаемому в отношении антоцианов. В условиях водного дефицита наблюдался значительный рост показателя: происходила активация защитных механизмов растений ячменя (рис. 6). Совместное действие водного дефицита и препарата Юнигель Плантум приводило к уменьшению уровня эндогенного пролина, по сравнению с вариантом водного дефицита. Такие изменения свидетельствуют о смягчении стрессовой реакции за счет препарата.

В отношении накопления пролина действие биоорганического препарата Юнигель Плантум проявлялось в двойном эффекте: увеличение метаболита в нормальных условиях и ограничение его избыточного накопления при водном дефиците. Такая динамика указывает на уменьшение осмотического стресса у растений ячменя.

Таким образом, препарат Юнигель Плантум нивелировал негативное воздействие стресса, вызванного водным дефицитом, за счет физиологических механизмов, описанных ниже.

Улучшение гидратации и поддержание роста – препарат Юнигель Плантум повышает доступность воды в почве за счет гидрогелевой структуры, что способствует частичной компенсации снижения тургора

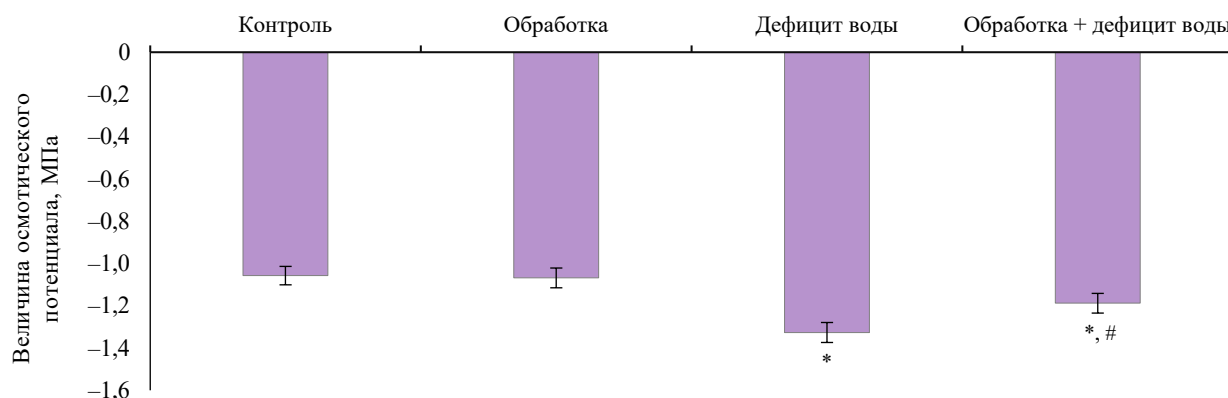


Рисунок 5. Влияние биоорганического препарата Юнигель Плантум на осмотический потенциал растений ячменя в условиях дефицита воды (* $p \leq 0,05$ по сравнению с контрольной группой; # $p \leq 0,05$ по сравнению с группой с дефицитом воды)

Figure 5. Effect of Unigel Plantum on osmotic potential of barley under water stress (* $p < 0.05$ vs. control; # $p < 0.05$ vs. water-deficient group)

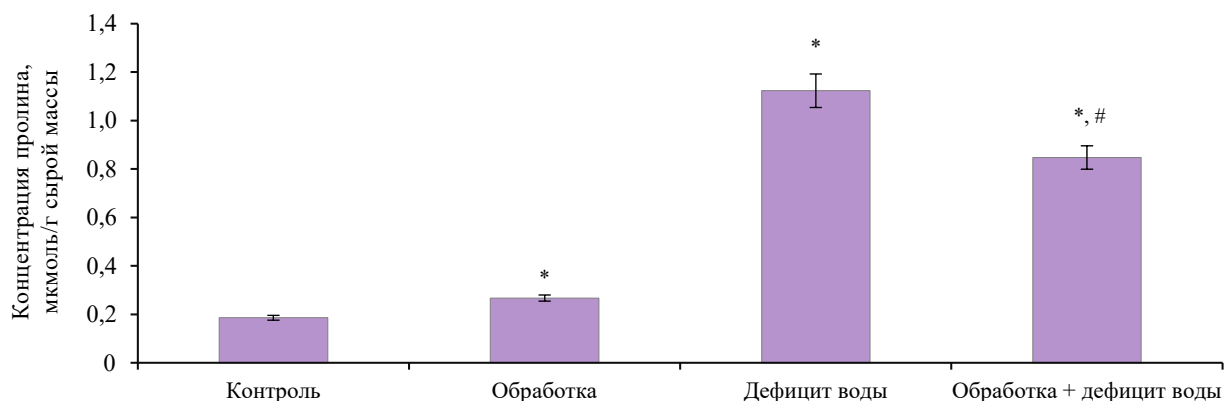


Рисунок 6. Влияние биоорганического препарата Юнигель Плантум на концентрацию пролина в растениях ячменя при водном дефиците (* $p \leq 0,05$ по сравнению с контрольной группой; # $p \leq 0,05$ по сравнению с группой с дефицитом воды)

Figure 6. Effect of Unigel Planthum on prolines in barley under water stress (* $p < 0.05$ vs. control; # $p < 0.05$ vs. water-deficient group)

и уменьшению негативного влияния водного дефицита на общий рост растений (увеличение сырой массы при стрессе).

Уменьшение окислительного стресса – хотя препарат не полностью снижает уровень перекисного окисления липидов, он косвенно уменьшает активность антиоксидантных веществ и окислительные повреждения, что улучшает целостность мембран и клеточную физиологию.

Регуляция антиоксидантной защиты через антоцианы – препарат Юнигель Плантум сокращает чрезмерное накопление антоцианов при водном стрессе, что говорит о снижении остроты стрессовой реакции и более сбалансированной антиоксидантной защите.

Поддержание осмотического потенциала – препарат способствует стабилизации осмотического потенциала клеточного сока листьев, предотвращая слишком сильное снижение, что важно для сохранения водного потенциала и обеспечения нормального водообмена.

Регулирование накопления пролина – препарат Юнигель Плантум повышает накопление пролина в нормальных условиях и ограничивает его чрезмерный рост при водном дефиците, снижая осмотический стресс и активируя метаболическую регуляцию, за счет этого уменьшая интенсивность защитных реакций, вызванных дефицитом воды.

Поддержание уровня фотосинтетических пигментов – использование препарата при водном дефиците способствовало сохранению более высокого уровня фотосинтетических пигментов, по сравнению с необработанными растениями, находящимися в стрессовых условиях, что указывает на его защитную функцию в уменьшении негативного влияния водного стресса на фотосинтетическую систему.

Стрессовыносливость ячменя к водному дефициту с применением препарата Юнигель Плантум связана

с хорошо сформированной корневой системой. Ранее на листовом салате и редисе показано, что Юнигель Плантум благоприятно влияет на развитие корневой системы и повышает содержание отдельных незаменимых аминокислот и сухую массу растения [16].

Выводы

Использование биоорганического препарата Юнигель Плантум (Новосибирск, Россия) в обработке предварительно стратифицированных семян благоприятно влияет на развитие корневой системы ячменя, увеличение и сохранение фотосинтетических пигментов, активизацию и накопление защитных метаболитов (антоцианов и пролина). Указанные эффекты способствуют повышению солевыносливости растений и стабилизации их биологической продуктивности. Полученные результаты позволяют рекомендовать биопрепарат Юнигель Плантум для исследования в полевых условиях на культуре ячменя в соответствии с методами полевого опыта.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов в связи с публикацией данной статьи.

Критерии авторства

Все авторы внесли эквивалентный вклад в исследование и подготовку рукописи статьи.

Contribution

All authors made equivalent contributions to the research.

Conflict of interest

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

Список литературы / References

1. Zarei T. Balancing water deficit stress with plant growth-promoting rhizobacteria: A case study in maize. *Rhizosphere*. 2022;24:100621. <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2022.100621>
2. Sergeeva MN, Danilova ED, Efimova MV. Exogenous melatonin increases the drought tolerance of barley plants. *Russian Journal of Plant Physiology*. 2025;72(6):1–9. <https://doi.org/10.1134/S1021443725604847>
3. Simova-Stoilova L, Demirevska K, Petrova T, Tsenov N, Feller U. Antioxidative protection in wheat varieties under severe recoverable drought at seedling stage. *Plant, Soil and Environment*. 2008;54(12):529–536. <https://doi.org/10.17221/427-PSE>
4. Demidchik V, Straltsova D, Medvedev SS, Pozhvanov GA, Sokolik A, et al. Stress-induced electrolyte leakage: the role of K⁺-permeable channels and involvement in programmed cell death and metabolic adjustment. *Journal of Experimental Botany*. 2014;65(5):1259–1270. <https://doi.org/10.1093/jxb/eru004>
5. Mahmood T, Khalid S, Abdullah M, Ahmed Z, Shah MKN, et al. Insights into drought stress signaling in plants and the molecular genetic basis of cotton drought tolerance. *Cells*. 2020;9(1):105. <https://doi.org/10.3390/cells9010105>
6. Khaleghi A, Naderi R, Brunetti C, Maserti BE, Salami SA, et al. Morphological, physiochemical and antioxidant responses of *Maclura pomifera* to drought stress. *Scientific Reports*. 2019;9:19250. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-55889-y>
7. Shao H-B, Chu L-Y, Jaleel CA, Manivannan P, Panneerselvam R, et al. Understanding water deficit stress-induced changes in the basic metabolism of higher plants – biotechnologically and sustainably improving agriculture and the ecoenvironment in arid regions of the globe. *Critical Reviews in Biotechnology*. 2009;29(2):131–151. <https://doi.org/10.1080/07388550902869792>
8. Huang C, Sun M, Ma S, Liu Z, Zhang K, et al. Effects of water deficit at different stages on growth and ear quality of waxy maize. *Frontiers in Plant Science*. 2023;14:1069551. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1069551>
9. Hu F, Zhang Y, Guo J. Effects of drought stress on photosynthetic physiological characteristics, leaf microstructure, and related gene expression of yellow horn. *Plant Signaling & Behavior*. 2023;18(1):2215025. <https://doi.org/10.1080/15592324.2023.2215025>
10. Kadir A, Setu A, Sharmin S, Hossain MA, Tahjib-Ul-Arif M, et al. Chitosan enhances drought tolerance in maize (*Zea mays* L.) by promoting growth and chlorophyll content while reducing hydrogen peroxide levels. *Fundamental and Applied Agriculture*. 2024;9(3):195–203. <https://doi.org/10.5455/faa.216212>
11. Aranaz I, Alcántara AR, Civera MC, Arias C, Elorza B, et al. Chitosan: An overview of its properties and applications. *Polymers*. 2021;13(19):3256. <https://doi.org/10.3390/polym13193256>
12. Malerba M, Cerana R. Recent advances of chitosan applications in plants. *Polymers*. 2018;10(2):118. <https://doi.org/10.3390/polym10020118>
13. Попова Э. В., Тютюрев С. Л., Юнчиц Л. Ф. Биологическая активность композиции на основе хитозанового препарата и микроэлементов. *Вестник защиты растений*. 2009. № 1. С. 52–55. [Popova EV, Tyuterev SL, Yunchits LF. Biological activity of a composition based on a chitosan preparation and microelements. *Plant Protection News*. 2023;(1):52–55. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/KAUMUH>
14. Тютюрев С. Л. Экологически безопасные индукторы устойчивости растений к болезням и физиологическим стрессам. *Вестник защиты растений*. 2015. № 1. С. 3–13. [Tyuterev SL. Ecologically safe inducers of plant resistance to diseases and physiological stresses. *Plant Protection News*. 2015;(1):3–13. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/TRZQQL>
15. Dubovskaia PI, Saeidi A, Pronchenko AA, Drannikova AI, Lukoyanov IA, et al. Gel-Phase synthesis and pH-sensitive swelling-structure relationships of N-Carboxyethylchitosan. *Eurasian Journal Of Chemistry*. 2025;30(2):19–33. <https://doi.org/10.31489/2959-0663/2-25-6>
16. Арипова Ф. К., Гончарова Е. П., Рябинина В. А., Коркина В. И., Плотников К. О. и др. Влияние препарата Юнигель Плантум на качество урожая листового салата. *Техника и технология пищевых производств*. 2025. Т. 55. № 2. С. 429–438. [Aripova FK, Goncharova EP, Ryabinina VA, Korkina VI, Plotnikov KO, et al. The effect of the Unihel Plantum preparation on the quality of lettuce crops. *Food Processing: Techniques and Technology*. 2025;55(2):429–438. (In Russ.)] <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2025-2-2583>
17. Новикова И. И., Попова Э. В., Колесников Л. Е., Колесникова Ю. Р., Чекурова С. С. Устойчивость к болезням, продуктивность и содержание фотосинтетических пигментов в листьях яровой мягкой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) под влиянием полифункциональных биопрепаратов и комплексов на основе микроорганизмов и хитозана. *Сельскохозяйственная биология*. 2023. Т. 58. № 1. С. 158–183. [Novikova II, Popova EV, Kolesnikov LE, Kolesnikova YuR, Chekurova SS. Multifunctional biopreparations and complexes based on microorganisms and chitosan increase diseases resistance, productivity and leaf photosynthetic pigment contents in spring soft wheat (*Triticum aestivum* L.). *Agricultural Biology*. 2023;58(1):158–183. (In Russ.)] <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2023.1.158rus>
18. Buege JA, Aust SD. Microsomal lipid peroxidation. *Methods in Enzymology*. 1978;52:302–310. [https://doi.org/10.1016/s0076-6879\(78\)52032-6](https://doi.org/10.1016/s0076-6879(78)52032-6)
19. Муравьева Д. А., Бубенчикова В. Н., Беликов В. В. Спектрофотометрическое определение суммы антоцианов в цветках василька синего. *Фармация*. 1987. № 5. С. 28–29. [Muravyova DA, Bubenchikova V. N, Belikov VV. Spectrophotometric tests of total anthocyanin in cornflower flowers (*Centaurea cyanus*). *Pharmacy*. 1987;(5):28–29.

20. Bates LS, Waldren RP, Teare ID. Rapid determination of free proline for water-stress studies. *Plant and Soil*. 1973;39:205–207.
21. Lichtenthaler HK. Chlorophylls and carotenoids: Pigments of photosynthetic biomembranes. *Methods in Enzymology*. 1987;148:350–382. [https://doi.org/10.1016/0076-6879\(87\)48036-1](https://doi.org/10.1016/0076-6879(87)48036-1)
22. Хамидуллина Л. А., Тобышева П. Д., Черепанова О. Е., Пузырев И. С., Пестов А. В. Карбоксиалкильные производные хитозана как перспективные регуляторы роста и развития лекарственных растений. *Вестник Российской Академии наук*. 2023. Т. 93. № 7. С. 684–691. [Khamidullina LA, Tobysheva PD, Cherepanova OE, Puzyrev IS, Pestov AV. Carboxyalkyl derivatives of chitosan as promising growth and development regulators of medical plant. *Vestnik RAN*. 2023; 93(7):684–691. (In Russ.)] <https://doi.org/10.31857/S0869587323070046>
23. Mushtaq NU, Saleem S, Rasool A, Shah WH, Tahir I, *et al*. Proline Tagging for Stress Tolerance in Plants. *International Journal of Genomics*. 2025;2025:9348557. <https://doi.org/10.1155/ijog/9348557>

Дополнительная информация об авторах / Additional information about the authors

Арипова Фарида Казбековна / Farida K. Aripova ORCID 0009-0006-4541-1112; eLIBRARY SPIN 3623-2477
Данилова Елена Дмитриевна / Elena D. Danilova ORCID 0000-0002-4752-3728; eLIBRARY SPIN 2989-0073
Бойко Екатерина Владимировна / Ekaterina V. Boyko ORCID 0000-0003-3815-872X; eLIBRARY SPIN 7883-4521
Кадырбаев Максат / Maksat Kadyrbaev ORCID 0000-0002-7795-7308; eLIBRARY SPIN 4842-9137
Ражабов Асатилло Иргашевич / Asatillo I. Rajabov ORCID 0000-0001-9738-0115
Душанова Гавхар Абдукаримовна / Gavhar A. Dushanova ORCID 0000-0003-0971-5160
Дранников Александр Алексеевич / Aleksandr A. Drannikov ORCID 0000-0002-4839-1667; eLIBRARY SPIN 4467-5468
Литвинова Екатерина Анатольевна / Ekaterina A. Litvinova ORCID 0000-0001-6398-7154; eLIBRARY SPIN 2995-8611

<https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-1-2628>
<https://elibrary.ru/HPVGTU>

Оригинальная статья
<https://fptt.ru>

Влияние параметров механоактивации на выход и свойства биологически активных веществ коры *Populus tremula* L.



В. П. Сергун¹, М. М. Шамова^{2,3},
В. М. Позняковский⁴, И. Ю. Сергеева^{1,*}

¹ Кемеровский государственный университет , Кемерово, Россия

² Национальный исследовательский Томский государственный университет , Томск, Россия

³ Общество с ограниченной ответственностью «БИОЛИТ», Томск, Россия

⁴ Кемеровский государственный медицинский университет, Кемерово, Россия

Поступила в редакцию: 21.12.2025

Принята после рецензирования: 09.02.2026

Принята к публикации: 03.03.2026

*e-mail: sergeeva.76@list.ru

© В. П. Сергун, М. М. Шамова, В. М. Позняковский,

И. Ю. Сергеева, 2026



Аннотация.

Повышение эффективности извлечения биологически активных веществ из растительного сырья является одной из ключевых задач современной биотехнологии и фармацевтической технологии. Однако композитная структура древесного сырья создает основной диффузионный барьер для экстракции ценных вторичных метаболитов. Цель работы – установить количественные зависимости между режимами механоактивации измельчения коры осины обыкновенной (*Populus tremula* L.), изменением ее структурно-физических характеристик и кинетикой извлечения биологически активных веществ.

Объектами исследования послужили образцы коры осины обыкновенной (Томская область, Россия). Механоактивацию проводили в планетарной мельнице АГО-2С.

Установлено, что при центробежном ускорении шаров 300 м/с² в течение 5–10 мин выход водно-спиртовых фракций возрастал на 9,5–19 %, при 600 м/с² – на 40–44 %. При скорости вращения 1395 об/мин (7–10 мин обработки) количество извлекаемых полифенолов достигло прироста 34,6 %, при 1820 об/мин – до 61,5 %. Наибольший выход салицина наблюдался при 1820 об/мин в течение 1–3 мин и составил от 0,80 ± 0,01 до 1,00 ± 0,02 % масс. Диспергирование коры осины в течение 3 мин при 1395 об/мин приводило к повышению доли углеводной составляющей D1080/D1460, спиртовых D1140/D1460, карбоксильных групп D1280/D1460, -C=C- D1600/D1460 и ОН-групп D3400/D1460. При этом уменьшалось количество алкильных заместителей D2920/D1460 и карбонильных групп D1720/D1460. Механоактивация измельчения сырья в течение 1 мин при 1395 об/мин приводила к увеличению содержания антиоксидантов до 1,15 ± 0,02 моль/кг и появлению второго типа ингибиторов, при частоте вращения реакторов 1820 об/мин в течение 5 мин – 1,66 ± 0,03 моль/кг, период индукции – 90 мин.

Применение выявленных закономерностей и внедрение стадии механоактивации на действующих производствах позволили модернизировать процесс, повысив его рентабельность, а также обеспечить более полное использование возобновляемого растительного сырья для получения ценных биологически активных веществ.

Ключевые слова. Механоактивация, диспергирование, экстракция, осина, кора, *Populus tremula* L., фенолгликозиды, салицин, полифенолы, антиоксиданты

Для цитирования: Сергун В. П., Шамова М. М., Позняковский В. М., Сергеева И. Ю. Влияние параметров механоактивации на выход и свойства биологически активных веществ коры *Populus tremula* L. Техника и технология пищевых производств. 2026 Т. 56. № 1 С. 122–134. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-1-2628>

Mechanically Activated Extraction of Bioactive Substances from *Populus tremula* L. Bark: Yield and Functional Properties



Valery P. Sergun¹, Maria M. Shamova^{2,3},
Valery M. Poznyakovsky⁴, Irina Yu. Sergeeva^{1,*}

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

²Tomsk State University^{ROR}, Tomsk, Russia

³LLC BIOLIT, Tomsk, Russia

⁴Kemerovo State Medical University, Kemerovo, Russia

Received: 21.12.2025

Revised: 09.02.2026

Accepted: 03.03.2026

*e-mail: sergeeva.76@list.ru

© V.P. Sergun, M.M. Shamova, V.M. Poznyakovsky,
I.Yu. Sergeeva, 2026



Abstract.

A more efficient extraction of bioactive plant substances is a major biotechnological and pharmaceutical challenge. The composite structure of wood fiber creates a major diffusion barrier to the extraction of valuable secondary metabolites. This research established some reliable correlations between the mechanical activation modes, the structural and physical profile of tree bark, and the bioactive extraction kinetics.

The study involved aspen (*Populus tremula* L.) bark harvested in the Tomsk Region, Russia. The mechanical activation was performed in an AGO-2S planetary mill.

At a centrifugal acceleration of 300 m/s² for 5–10 min, the yield of water-alcohol fractions increased by 9.5–19%; when it was raised to 600 m/s², the yield increased by 40–44%. The yield of extracted polyphenols reached 34.6% at 1,395 rpm (7–10 min) and 61.5% at 1,820 rpm. The highest yield of salicin occurred at 1,820 rpm for 1–3 min and was between 0.80 ± 0.01 and 1.00 ± 0.02% by weight. A three-minute dispersion of aspen bark at 1,395 rpm increased the share of the carbohydrate component D1080/D1460, alcohol D1140/D1460, carboxyl groups D1280/D1460, -C=C- D1600/D1460, and OH groups D3400/D1460 while the number of alkyl substituents D2920/D1460 and carbonyl groups D1720/D1460 decreased. The mechanical activation of raw material during one-minute grinding at 1,395 rpm raised the antioxidant content to 1.15 ± 0.02 mol/kg and led to the formation of second type inhibitors. When the reactor speed remained 1,820 rpm for 5 min, the increase reached 1.66 ± 0.03 mol/kg, with an induction period of 90 min.

The identified patterns of mechanical pretreatment increased the profitability and sustainability of producing valuable bioactive substances from renewable plant raw materials.

Keywords. Mechanical activation, dispersion, extraction, aspen, bark, *Populus tremula* L., phenylglycosides, salicin, polyphenols, antioxidants

For citation: Sergun VP, Shamova MM, Poznyakovsky VM, Sergeeva IYu. Mechanically Activated Extraction of Bioactive Substances from *Populus tremula* L. Bark: Yield and Functional Properties. Food Processing: Techniques and Technology. 2026;56(1):122–134. (In Russ.) <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-1-2628>

Введение

Растительное сырье представлено ценным возобновляемым источником широкого спектра химических соединений, включающих не только структурные углеводы, но и значительный пул биологически активных веществ (БАВ) – антиоксидантов, иммуномодуляторов и других минорных компонентов с фармакологическим потенциалом [1–6]. Ключевая технологическая проблема их извлечения заключается в физико-химической недоступности: значительная часть целевых БАВ

сосредоточена внутри клеток, окруженных оболочками сложной химической организации, что препятствует их эффективному переходу в биодоступную форму при использовании традиционных методов.

Растительное сырье – это гетерогенная природная матрица, сложность которой определяется как многокомпонентным химическим составом, так и иерархической морфологией клеточных стенок. Именно надмолекулярная организация основных структурных биополимеров – целлюлозы, гемицеллюлоз и лигнина –

является ключевым фактором, лимитирующим кинетику и эффективность процессов их химической и экстракционной переработки. С позиции механохимии критическое значение имеет архитектура лигноцеллюлозного комплекса: микрофибриллы целлюлозы, погруженные в матрикс гемицеллюлоз, формируют жесткий каркас, который ковалентно и нековалентно связан трехмерной сетью полифенольного лигнина, выступающего в роли природного связующего. Эта композитная структура создает основной диффузионный барьер, в то время как ценные вторичные метаболиты часто локализованы внутри отдельных клеток, дополнительно изолированных сложными лигниноцеллюлозными оболочками, липидными мембранами и воскоподобными кутикулами [7].

Современные процессы переработки природного органического сырья для получения минорных компонентов в основном базируются на методах жидкостной экстракции. Для селективного выделения целевых фракций применяют последовательную обработку полярными и неполярными растворителями или их смесями [8]. Однако кинетика и общий выход при таких процессах лимитируются факторами массопереноса. Диффузия экстрагента к внутренним клеткам растительной матрицы и последующая диффузия растворенных БАВ к поверхности являются определяющими и часто медленными стадиями, поскольку химическое взаимодействие происходит на границе раздела фаз.

Основное стратегическое направление интенсификации подобных процессов заключается в преодолении диффузионных ограничений. Для этого необходимо повысить доступность внутренней поверхности сырья и разрушить естественные барьеры. Достигается это за счет применения различных механических и механохимических воздействий, которые приводят к разрыхлению компактной структуры межклеточного вещества, частичной деструкции или деполимеризации его полимерных компонентов (лигнина, гемицеллюлоз) [9]. Особое значение имеет дезинтеграция липидных оболочек (кутикулы, мембран), выступающих непреодолимым барьером для гидрофильных экстрагентов и критическим фактором для высвобождения большинства внутриклеточных минорных компонентов.

В связи с этим поиск и внедрение интенсифицирующих методов предобработки сырья и экстрагирования являются актуальными научно-практическими проблемами. Одним из наиболее эффективных и экологически безопасных подходов выступает механоактивация – направленное воздействие на твердое тело концентрированной механической энергией, приводящее к изменению его физико-химических и структурно-морфологических свойств [10]. Применительно к растительным материалам механохимическая активация в процессе измельчения (например, в планетарных мельницах, дезинтеграторах или виброцентробежных мельницах) не только обеспечивает сверхтонкий помол, но и индуцирует глубокие структурные изменения: разру-

шение клеточных стенок, аморфизация кристаллических фракций, увеличение удельной поверхности и создание дефектов в макромолекулах биополимеров [11].

Предварительная механическая активация обеспечивает достижение максимальной эффективности на стадии последующего экстрагирования. Ударно-сдвиговое воздействие сопровождается измельчением и разупорядочением структуры обрабатываемого материала, что существенно облегчает выделение компонентов, т. к. при размере частиц растительного сырья около 10 мкм разрушается большая часть клеточных перегородок [12].

Механическое воздействие представляет собой комбинацию нормального давления и сдвиговых деформаций. Давление преимущественно влияет на характер межчастичных взаимодействий, а площадь и число эффективных контактов между частицами являются ключевыми параметрами, определяющими скорость механохимических превращений. Однако зависимость эффективности процесса от давления имеет экстремальный характер: превышение оптимального значения приводит к чрезмерному уплотнению материала, в результате чего лимитирующей стадией становится диффузия реагентов в объеме частиц через вакансии, подавляемая повышенным давлением [13, 14].

Повышение эффективности извлечения биологически активных веществ из растительного сырья является одной из ключевых задач современной биотехнологии и фармацевтической технологии. Особый интерес в этом контексте представляет кора осины обыкновенной (*Populus tremula* L.) – перспективный источник ценных веществ, в частности фенолгликозидов (салицина, популина, тремулоидина), обладающих доказанной противовоспалительной, противомикробной и антиоксидантной активностью [15–18]. Технологическая переработка коры сопряжена с существенными трудностями, обусловленными особенностями гистологического строения [19]. Наличие плотных пробковых тканей, одревесневших элементов и высокомолекулярных полимеров (лигнина, целлюлозы) формирует выраженный диффузионный барьер, что приводит к низкой скорости экстракции, необходимости применения агрессивных сред, высоких температур и длительного времени процесса; это, в свою очередь, может спровоцировать деградацию целевых термолабильных соединений.

Ключевые факторы, обуславливающие актуальность исследования:

- необходимость преодоления природных барьеров экстракции. Традиционное измельчение коры до частиц размером 2–5 мм не обеспечивает достаточной дезинтеграции лигниноцеллюлозного комплекса. Механоактивация позволяет достичь микро- и наноразмеров, разрушая клеточные структуры и делая БАВ более доступными для экстрагента;
- соответствие современным тенденциям перехода к технологиям, обеспечивающим снижение расхода

органических растворителей, температуры и продолжительности процесса. Механоактивация как физический метод предобработки отвечает принципам устойчивого развития, минимизируя негативное воздействие на окружающую среду;

– повышение экономической эффективности. Интенсификация процесса за счет механоактивации приводит к сокращению энергозатрат (вследствие ускорения экстракции), увеличению выхода целевых БАВ и, как следствие, снижению себестоимости готового экстракта;

– создание новых продуктов с улучшенными характеристиками. Возможность получения экстрактов с более высоким и стабильным содержанием маркерных веществ (например, салицина) имеет принципиальное значение для стандартизации фитопрепаратов и их соответствия требованиям фармакопей.

Практическая значимость работы заключается в непосредственном технологическом применении полученных результатов. Для фармации особое значение имеет разработка и внедрение научно-обоснованного технологического регламента получения стандартизированного экстракта из сырья определенного климатогеографического ареала, включающего стадию механоактивации. Это позволит создавать новые эффективные отечественные лекарственные средства и биологически активные добавки к пище на основе местного сырья. Внедрение стадии механоактивации на действующих производствах позволит модернизировать процесс, повысив его рентабельность. Сокращение продолжительности мацерации с 6–8 до 1–2 ч при переходе к динамической экстракции предварительно обработанного сырья способствует увеличению пропускной способности производственной линии. Данная технологическая стадия позволит более полно использовать возобновляемое растительное сырье (кора древесного сырья нередко служит отходом лесозаготовки), повышая комплексность и экологичность лесопользования.

Цель работы – установить количественные зависимости между режимами механохимической активации измельчения коры *Populus tremula* L., изменением ее структурно-физических характеристик и кинетикой извлечения комплекса биологически активных веществ.

Объекты и методы исследования

Объектами исследования послужили образцы коры осины обыкновенной (*Populus tremula* L.), произрастающей в Томской области (Россия).

Содержание суммы водорастворимых экстрактивных веществ в сырье определяли методом предварительного кипячения измельченного сырья с водой на водяной бане с обратным холодильником в течение 1,5 ч. Полученный экстракт высушивали и взвешивали. Содержание экстрактивных веществ выражали в процентах в пересчете на абсолютно сухое сырье.

Определение содержания суммы водно-спиртовых экстрактивных веществ в сырье реализовывали путем добавления к измельченному сырью, просеянному сквозь сито с отверстиями диаметром 1 мм, и к нанодиспергированному сырью 70 % этанола в качестве растворителя. Смесь нагревали при слабом кипении в течение 2 ч. Экстракт высушивали и взвешивали. Содержание экстрактивных веществ выражали в процентах в пересчете на абсолютно сухое сырье.

Оценку концентрации полифенолов проводили колориметрическим методом с применением реактива Фолина-Чокальтеу с регистрацией оптической плотности при длине волны 765 нм по ГОСТ Р ИСО 14502-1-2010.

Анализ содержания салицина в коре осины осуществляли методом высокоэффективной жидкостной хроматографии на хроматографе LC-2010 (Shimadzu, Япония) с предварительным переводом салицина из образца нанодиспергированной коры осины в раствор путем экстракции навески водой. Регистрацию аналитического сигнала салицина проводили при градиентном элюировании с помощью ультрафиолетового детектора, руководствуясь МУ 08-47/172 «Кора ивы и осины, экстракты из них и БАД на их основе. ВЭЖХ метод определения массовой концентрации салицина».

Установление спектральных характеристик полученных экстрактов осуществляли с использованием ИК-Фурье спектрометра ФСМ 1202 (ООО «Инфраспек», Россия).

Содержание антиоксидантов в экстрактах из диспергированного сырья определяли кинетическим методом при помощи модельной реакции инициированного окисления кумола при 60 °С в присутствии инициатора [20, 21].

Исследования морфологии и гранулометрии измельченного сырья организовывали методами электронной дифракционной микроскопии (прибор JEM-100CX, JEOL, Япония). Объект исследования готовили следующим образом: измельченное сырье суспензировали в дистиллированной воде с помощью ультразвукового диспергатора; суспензию наносили на сетки, покрытые формваровой пленкой – подложкой.

Для определения средних размеров частиц и их распределений по размерам проводили измерения по фотографиям (при нанометровых размерах частиц) либо (при субмикронных размерах частиц) в колонне микроскопа, используя мерную шкалу, нанесенную на экран. Число измерений составляло 300–500, в зависимости от степени размерной однородности порошка.

Методика проведения механохимической обработки растительного сырья. Механоактивацию растительного сырья проводили в планетарной мельнице АГО-2С (разработка Института химии твердого тела и механохимии СО РАН, Новосибирск, Россия).

Независимо от аппаратного оформления процесса, механоактивацию можно представить как сочетание ударной и сдвиговой деформаций в зонах контакта

между воздействующими телами и частицами твердого вещества [22]. Обработка в планетарной мельнице АГО-2С характеризуется ударным воздействием. Технические характеристики мельницы АГО-2С приведены в таблице 1.

В конструкции планетарной мельницы АГО-2С с периодической загрузкой использовались два барабана, вращающихся вокруг центральной и собственной осей. Передача вращения осуществлялась фрикционным путем. Для охлаждения барабанов-реакторов и смазывания использовалась холодная вода. Каждый барабан представлял собой стальной полый цилиндр. В проведенных экспериментах барабаны загружали приблизительно на 1/3 объема стальными шарами, еще на 1/3 – исследуемым веществом; оставшаяся 1/3 объема приходилась на воздушную прослойку.

Сырье предварительно измельчали в дезинтеграторе Nossen 8255 до размера частиц 1–3 мм (частота вращения измельчающих частей 3000 об/мин).

Измельченные образцы и реагенты взвешивали на аналитических весах, затем смешивали в барабанах. Время пребывания веществ в зоне обработки варьировали от 1 до 10 мин при температуре 22 ± 1 °С.

Результаты и их обсуждение

Электронно-микроскопические исследования нанодиспергированной коры осины. Процесс измельчения коры осины до наноразмерных частиц изучали

при помощи электронно-микроскопических исследований. На рисунке 1 приведены фотографии образцов, обработанных при скоростях вращения реакторов 1395, 1820 и 3200 об/мин в течение 5 мин.

Крупные частицы представляли собой ассоциированные наноразмерные объекты. Диспергирование порошка в дистиллированной воде с помощью ультразвукового диспергатора не позволило до конца разбить слипшиеся частицы (рис. 2).

В ходе обработки сырья в реакторах планетарной мельницы обнаружено, что при частоте вращения 1395 об/мин преобладали частицы диаметром 170 нм, а при 1820 об/мин – 98 нм. Наибольшая доля частиц (44 %) диаметром 55 нм получена при скорости вращения реактора 3200 об/мин. Частицы размером более 300 нм в расчет не принимались.

На основании данных и с учетом технико-экономических показателей процесса в дальнейших исследованиях использовались режимы обработки при скоростях вращения реактора 1395 и 1820 об/мин.

Исследование влияния условий механообработки на выход экстрактивных веществ. Совмещение механической дезинтеграции с контролируемой химической трансформацией в присутствии химических реагентов позволяет целенаправленно изменять физико-химические свойства структурных биополимеров (целлюлозы, лигнина, гемицеллюлоз), что является ключевым фактором интенсификации последующей

Таблица 1. Технические характеристики планетарной мельницы АГО-2С

Table 1. Technical characteristics of AGO-2C planetary mill

Характеристики	АГО-2С
Режим работы	периодический
Максимальный исходный размер частиц материала, мм	3
Допустимое время непрерывной работы, мин	30
Рекомендуемое время работы, мин	не более 10
Количество помольных барабанов, шт	2
Объем одного барабана, мл	150
Мелющие тела	стальные шары 8–10 мм
Масса шаровой загрузки одного барабана, кг	0,15–0,20
Частота вращения барабанов в переносном движении, об/мин	1395, 1820, 3200
Центробежное ускорение, развиваемое мелющими телами, м/с ²	300, 600, 1000
Ориентировочное время измельчения материала, мин	1–5

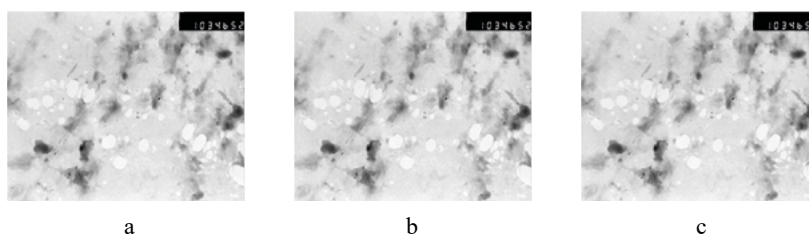


Рисунок 1. Образцы измельченной коры осины при скорости вращения реакторов в течение 5 мин (увеличение $\times 144000$): а – 1395 об/мин; б – 1820 об/мин; в – 3200 об/мин

Figure 1. Crushed aspen bark after 5 min at: а – 1,395 rpm; б – 1,820 rpm; and в – 3,200 rpm (magnification $\times 144,000$)

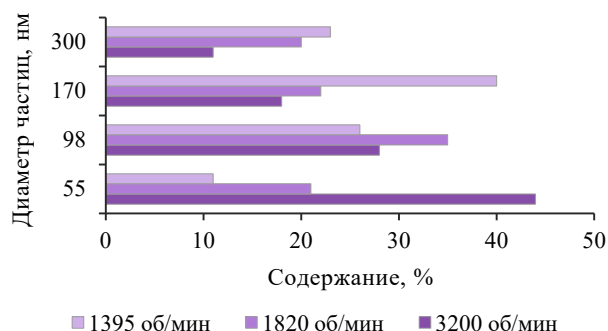


Рисунок 2. Распределение частиц измельченной коры осины по размерам

Figure 2. Particle size distribution of crushed aspen bark

экстракции целевых низкомолекулярных соединений. Эффективность данного подхода продемонстрирована на примере механоактивации порошков коры осины в присутствии твердой щелочи (например, NaOH или KOH) [23]. Интенсивное измельчение совместно со щелочами приводит к формированию реакционно-способного композита с развитой межфазной поверхностью, в котором микрочастицы щелочи равномерно распределяются в объеме материала с разрушенной клеточной структурой. Последующая гидратация такого композита в одностадийном процессе позволяет достичь предельного выхода водорастворимых веществ (в частности, фенолгликозидов), благодаря чему стадия предварительного обезжиривания становится излишней. Однако с позиций «зеленой» химии и ресурсосбережения наиболее перспективным подходом является разработка безотходных технологий прямой механохимической модификации компонентов растительного сырья в твердой фазе. В отличие от традиционной воднощелочной экстракции, неэффективной из-за блокирующего действия нерастворимых липидов и смол [24], механохимическая предобработка обеспечивает синергию физического разрушения барьеров и их химической модификации, существенно повышая доступность целевых биологически активных веществ (БАВ).

Механическую активацию применяют для повышения выхода водорастворимых веществ из коры лиственных и хвойных пород. Основными извлекаемыми компонентами коры хвойных деревьев являются дубильные вещества и пектин. При чрезмерном увеличении дисперсности сырья выход экстрактивных веществ снижается. Технологическим преимуществом механообработки коры выступает низкая продолжительность процесса отделения осадка от раствора [25].

В исследовании в образцах измельченной и диспергированной коры осины определяли содержание водно-спиртовых и водорастворимых веществ, полифенольных веществ и салицина в зависимости от скорости вращения барабанов и времени механообработки. Результаты приведены в таблицах 2 и 3.

В рамках исследования установлено, что выход водно-спиртовых веществ (ВСВ) максимально возрастает на 9,5–19 % при механоактивации в течение 5–10 мин и центробежном ускорении шаров 300 м/с². Независимо от времени механоактивации при скорости вращения реакторов 1395 об/мин количество извлекаемых ВСВ повышается незначительно. Из-за низкого выхода ВСВ увеличение времени обработки свыше 5 мин нецелесообразно.

Повышение ускорения шаров до 600 м/с² (скорость вращения 1820 об/мин) приводит к более существенному увеличению количества извлекаемых ВСВ – на 40–44 % при механоактивации 5–10 мин. С учетом технологических и экономических факторов оптимальная продолжительность механоактивации – 5 мин.

При минимальной скорости вращения 1395 об/мин количество извлекаемых полифенолов слабо зависит от времени обработки, достигая максимального прироста (34,6 %) при 7 и 10 мин обработки. В более жестких условиях диспергирования (скорость вращения 1820 об/мин) увеличение времени обработки способствует повышению выхода полифенолов до 61,5 %. Исходя из экономических и технологических аспектов переработки, диспергирование сырья в течение 3–5 мин является оптимальным.

При этом оптимальное время механоактивации сырья при скорости вращения барабанов 1395 об/мин –

Таблица 2. Влияние скорости вращения барабанов и времени механообработки коры осины на выход экстрактивных водно-спиртовых и водорастворимых веществ, полифенолов и салицина

Table 2. Effect of rotation speed and processing time on extracted water-alcohol and water-soluble substances, polyphenols, and salicin

Время обработки, мин	Содержание веществ, % масс							
	1395 об/мин				1820 об/мин			
	Водно-спиртовые	Поли-фенольные	Салицин	Водорастворимые	Водно-спиртовые	Поли-фенольные	Салицин	Водорастворимые
0	22,1 ± 0,4	2,60 ± 0,05	0,50 ± 0,01	13,6 ± 0,3	22,1 ± 0,4	2,60 ± 0,05	0,50 ± 0,01	13,6 ± 0,3
1	22,1 ± 0,4	2,60 ± 0,05	0,70 ± 0,01	28,4 ± 0,6	24,2 ± 0,5	2,90 ± 0,06	0,80 ± 0,01	32,0 ± 0,6
3	23,2 ± 0,5	3,00 ± 0,06	0,90 ± 0,02	32,6 ± 0,7	28,9 ± 0,6	3,50 ± 0,07	1,00 ± 0,02	60,4 ± 1,2
5	24,2 ± 0,5	3,00 ± 0,06	1,00 ± 0,02	41,0 ± 0,8	31,0 ± 0,6	3,90 ± 0,08	1,00 ± 0,02	29,1 ± 0,6
7	24,2 ± 0,5	3,50 ± 0,07	1,00 ± 0,02	24,2 ± 0,5	30,0 ± 0,6	4,00 ± 0,08	1,10 ± 0,02	23,6 ± 0,5
10	26,3 ± 0,6	3,50 ± 0,07	1,00 ± 0,02	22,1 ± 0,4	32,0 ± 0,6	4,20 ± 0,08	1,10 ± 0,02	20,5 ± 0,4

Таблица 3. Спектральные коэффициенты водных экстрактов коры осины при различных условиях механоактивации

Table 3. Spectral coefficients of aqueous extracts of aspen bark under various mechanical activation conditions

Время, мин	Отношение оптических плотностей поглощения						
	D_{1080}/D_{1460}	D_{1140}/D_{1460}	D_{1280}/D_{1460}	D_{1600}/D_{1460}	D_{1720}/D_{1460}	D_{2920}/D_{1460}	D_{3400}/D_{1460}
Скорость вращения 1395 об/мин							
0	1,55	0,94	1,13	1,04	0,97	1,46	1,75
3	2,14	1,13	1,22	1,32	0,81	1,10	2,25
5	2,10	1,05	1,28	1,25	0,84	2,49	1,83
7	2,07	0,63	1,25	1,27	0,80	1,07	1,90
Скорость вращения 1820 об/мин							
3	2,08	0,98	1,21	1,28	0,87	1,20	1,86
5	2,13	1,09	1,20	1,37	0,83	1,31	1,96

5 мин (прирост водорастворимых веществ в 3 раза), а при 1820 об/мин – 3 мин (прирост более чем в 4 раза). Дальнейшее увеличение времени обработки резко снижает количество экстрагируемых веществ.

Наибольший выход салицина при механоактивации сырья в течение 1–3 мин получен в реакторах, вращающихся со скоростью 1820 об/мин. Последующее увеличение времени обработки (до 5, 7 и 10 мин) не приводит к заметному росту концентрации салицина. Его значение остается постоянным независимо от времени диспергирования сырья и скорости вращения реакторов. При механоактивации сырья в реакторах со скоростью 1395 об/мин в течение 1–3 мин выход салицина ниже, чем при скорости 1820 об/мин. При времени обработки 5–10 мин количество извлекаемого салицина остается неизменным.

В исследовании применены энергонапряженные режимы измельчения. При измельчении медной руды с использованием шаровых мельниц для повышения раскрытия рудных тел особое внимание уделяется оптимизации ключевых рабочих параметров, в том числе скорости вращения мешалки. Используя модели Гейтса-Годена-Шумана и функцию Розина-Рамлера-Бенне, А.М. Elbendari & S.S. Ibrahim установили оптимальную скорость вращения мешалки (500 об/мин),

позволяющую получать частицы (100 %) с размером порядка 1 мкм. Однако достижение данного показателя происходило при продолжительности процесса измельчения 17 ч [26].

Перспективным направлением является совершенствование конструкции аппаратов для измельчения. W.S. Soares *et al.* предложили систему выгрузки измельченного материала, которая изолирует подаваемый материал от механизма выгрузки. Это позволяет не только увеличить полезный объем мельницы, но и решить такие распространенные проблемы традиционных систем выгрузки через решетку, как обратный поток и пересыпание. Такая конструкция существенно повышает эффективность измельчения, о чем свидетельствуют увеличение степени разрушения и снижение удельного энергопотребления [27].

Учитывая достигнутые результаты в переработке минерального сырья, планируется изучить пути оптимизации энергозатрат касательно растительных объектов, с особым вниманием к пределу измельчения древесины.

Исследование спектральных характеристик экстрактивных веществ из коры осины. Для оценки влияния механоактивации на состав водных экстрактов из коры осины были сняты инфракрасные спектры, представленные на рисунках 3–7.

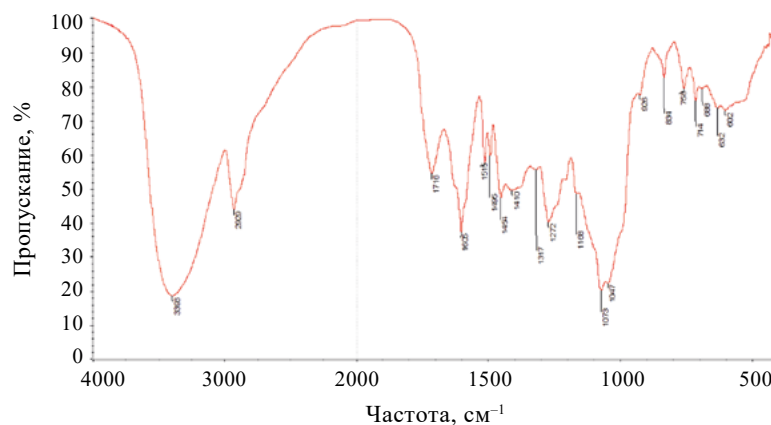


Рисунок 3. Инфракрасный спектр водорастворимых веществ, извлеченных из исходной коры осины

Figure 3. Infrared spectrum of water-soluble substances extracted from aspen bark

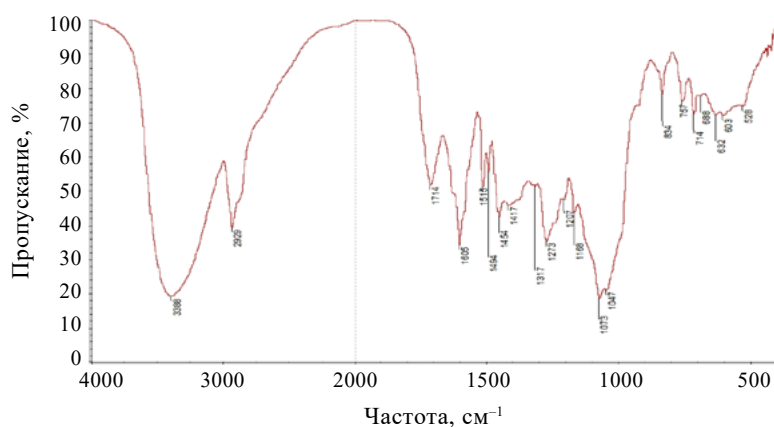


Рисунок 4. Инфракрасный спектр водорастворимых веществ, извлеченных из коры осины, обработанной при скорости вращения реакторов 1395 об/мин в течение 1 мин

Figure 4. Infrared spectrum of water-soluble substances extracted from aspen bark 1,395 rpm, 1 min

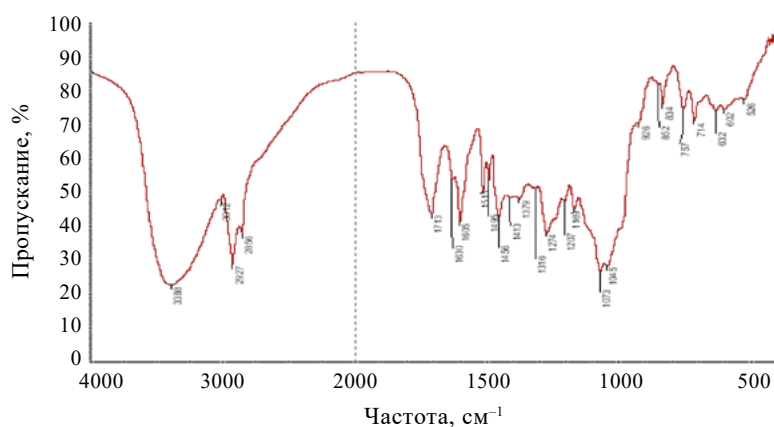


Рисунок 5. Инфракрасный спектр водорастворимых веществ, извлеченных из коры осины, обработанной при скорости вращения реакторов 1395 об/мин в течение 3 мин

Figure 5. Infrared spectrum of water-soluble substances extracted from aspen bark at 1,395 rpm, 3 min

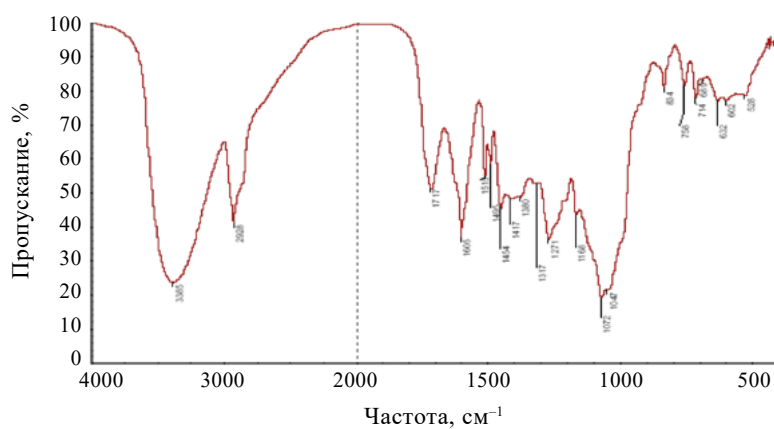


Рисунок 6. Инфракрасный спектр водорастворимых веществ, извлеченных из коры осины, обработанной при скорости вращения реакторов 1395 об/мин в течение 5 мин

Figure 6. Infrared spectrum of water-soluble substances extracted from aspen bark at 1,395 rpm, 5 min

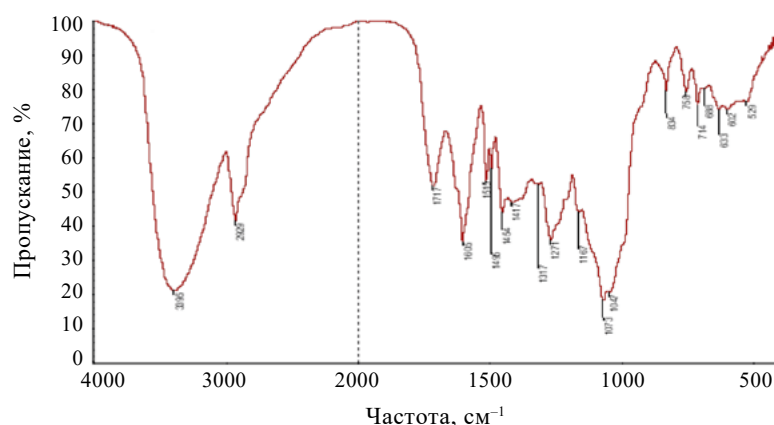


Рисунок 7. Инфракрасный спектр водорастворимых веществ, извлеченных из коры осины, обработанной при скорости вращения реакторов 1395 об/мин в течение 7 мин

Figure 7. Infrared spectrum of water-soluble substances extracted from aspen bark at 1,395 rpm, 7 min

Таблица 4. Содержание антиоксидантов и реакционная активность (K) антиоксидантов в водно-спиртовых экстрактах выделенных образцов коры осины, обработанных при разных условиях

Table 4. Content and reactivity (K) of antioxidants in water-alcohol extracts isolated from aspen bark under different conditions

Время обработки, мин	Антиоксиданты общ, моль/кг	¹ Антиоксиданты, моль/кг	² Антиоксиданты, моль/кг	¹ K, 10 ⁴ л/моль·с	² K, 10 ³ л/моль·с
Без обработки	0,76 ± 0,01	—	0,76 ± 0,01	—	5,10 ± 0,10
Скорость вращения 1395 об/мин					
1	1,15 ± 0,02	0,160 ± 0,003	0,99 ± 0,02	0,400 ± 0,008	3,20 ± 0,06
3	1,28 ± 0,02	0,280 ± 0,005	1,00 ± 0,02	0,300 ± 0,006	3,70 ± 0,07
5	1,44 ± 0,02	0,400 ± 0,008	1,04 ± 0,02	0,400 ± 0,008	2,60 ± 0,05
7	1,15 ± 0,02	0,210 ± 0,004	0,64 ± 0,01	0,300 ± 0,006	2,80 ± 0,05
10	0,96 ± 0,02	—	0,96 ± 0,02	—	5,60 ± 0,11
Скорость вращения 1820 об/мин					
1	1,21 ± 0,02	0,56 ± 0,01	0,65 ± 0,01	0,500 ± 0,010	4,20 ± 0,08
3	1,37 ± 0,03	0,32 ± 0,01	1,05 ± 0,02	0,300 ± 0,006	3,80 ± 0,07
5	1,66 ± 0,03	0,55 ± 0,01	1,11 ± 0,02	0,400 ± 0,008	3,20 ± 0,06

Примечание: ¹ – частота вращения реактора – 1395 об/мин; ² – частота вращения реактора – 1820 об/мин.

Note: ¹ – 1,395 rpm; ² – 1,820 rpm.

В спектре водорастворимых веществ из необработанной коры осины идентифицированы следующие полосы поглощения: 3400 см⁻¹ обусловлены ОН-группами, 2930 и 2870 см⁻¹ – СН₂- и СН₃-группами, 1700 см⁻¹ – СО- и СООН-группами, 1600 см⁻¹ – С=C-сопряженные, 1500–1510 см⁻¹ – С=C-ароматические, 1400 см⁻¹ – СН-, 1370–1120 см⁻¹ – спиртовые, 1200 см⁻¹ – карбоксильные, 1030 см⁻¹ – углеводные.

Механоактивация сырья даже при минимальной скорости вращения оказывала существенное влияние на состав водорастворимых веществ. Диспергирование коры осины в течение 3 мин приводило к повышению доли углеводной составляющей D_{1080}/D_{1460} , спиртовых D_{1140}/D_{1460} , карбоксильных групп D_{1280}/D_{1460} , -С=C- D_{1600}/D_{1460} и ОН-групп D_{3400}/D_{1460} . При этом уменьшалось количество алкильных заместителей D_{2920}/D_{1460} и карбонильных групп D_{1720}/D_{1460} (табл. 4). Условное

содержание функциональных групп (спектральные коэффициенты) рассчитывали как отношение оптических плотностей полос поглощения на разных длинах волн к оптической плотности полосы при 1460 см⁻¹.

В функциональном составе водорастворимых веществ из сырья, обработанного в течение 5 мин, происходили аналогичные изменения, за исключением повышения количества алкильных заместителей. Водный экстракт, извлеченный из сырья, обработанного в течение 7 мин, характеризовался уменьшением доли спиртовых групп и алкильных заместителей. Общей отличительной чертой всех образцов является значительное увеличение гидроксильных групп и сопряженных -С=C-фрагментов.

Изменения функционального состава водорастворимых веществ из коры осины, обработанной при 1820 об/мин, аналогичны изменениям, наблюдаемым

при обработке сырья в реакторах, вращающихся со скоростью 1395 об/мин.

Исследование влияния условий механоактивации на антиоксидантные свойства водно-спиртовых экстрактов, выделенных из коры осины. Кинетические параметры антиоксидантов водно-спиртовых экстрактов коры осины определяли модифицированным кинетическим методом на основе модельной реакции инициированного окисления кумола с добавлением диметилсульфоксида. Для скрининговых исследований выбран ряд образцов, полученных при частоте вращения реакторов 1395 и 1820 об/мин в течение 1–10 мин. Результаты определения антиоксидантов представлены в таблице 4 и на рисунках 8 и 9.

Анализ антиоксидантной активности водно-спиртовых экстрактов коры осины выявил значимое влияние режимов предшествующей механоактивации сырья.

Экстракт из нативного (необработанного) сырья показал относительно низкую антиоксидантную актив-

ность, характеризующуюся наличием одного типа антиоксидантов с содержанием $0,76 \pm 0,01$ моль/кг. Кинетика инициированного окисления модельного субстрата (кумола) в его присутствии демонстрирует период индукции (20 мин) и низкую константу скорости окисления, что свидетельствует о невысокой реакционной способности присутствующих ингибиторов.

Механоактивация приводит к существенной трансформации антиоксидантного профиля. Уже после 1 мин обработки общее содержание антиоксидантов возрастает до $1,15 \pm 0,02$ моль/кг, а в экстракте появляется второй тип ингибиторов. Максимальное содержание антиоксидантов ($1,66 \pm 0,03$ моль/кг) и наибольший период индукции (90 мин) достигаются после 5 мин обработки при скорости вращения 1820 об/мин. Дальнейшее увеличение времени активации приводит к снижению антиоксидантной активности, что связано с деградацией термолабильных соединений при длительном механическом воздействии.

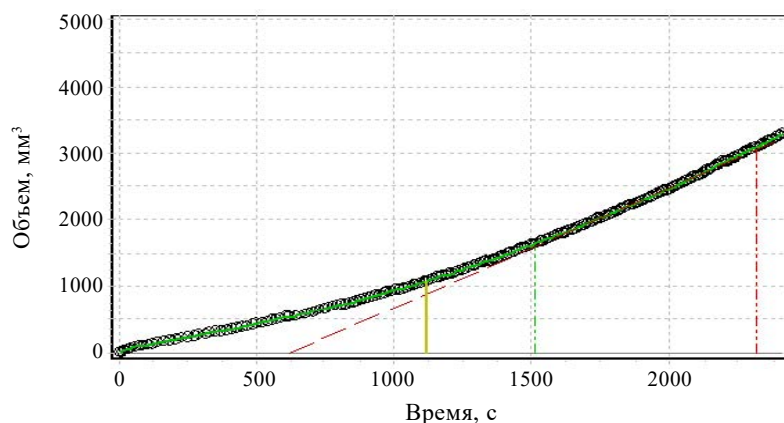


Рисунок 8. Кинетическая кривая поглощения кислорода кумолом в присутствии водно-спиртового экстракта необработанной коры осины (механоактивация в течение 5 мин)

Figure 8. Oxygen absorption by cumene in the presence of water-alcohol extract of untreated aspen bark after 5 min of mechanical activation

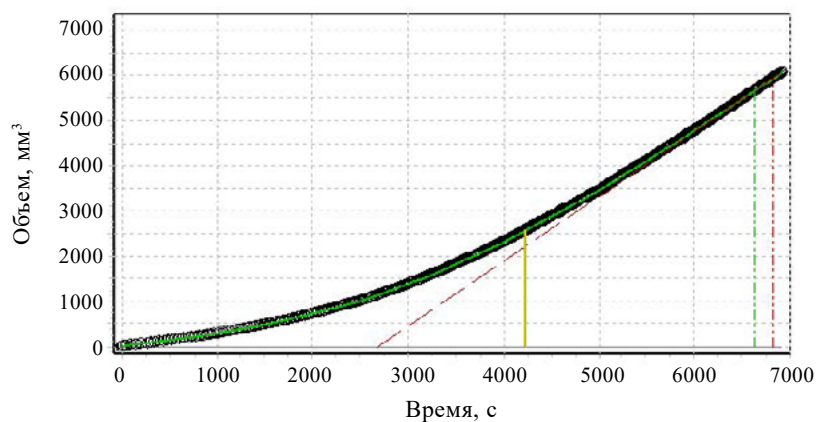


Рисунок 9. Кинетическая кривая поглощения кислорода кумолом в присутствии водно-спиртового экстракта коры осины (механоактивация в течение 5 мин)

Figure 9. Oxygen absorption by cumene in the presence of water-alcohol extract of aspen bark after 5 min of mechanical activation

Во всех экстрактах из механоактивированного сырья идентифицированы два типа антиоксидантов, различающихся реакционной способностью. При этом количественно преобладает менее активный тип.

Несмотря на увеличение общего пула антиоксидантов, значения констант скорости окисления для всех исследованных образцов остаются в области низких величин (табл. 4). Это указывает на то, что основными ингибиторами окисления в экстрактах коры осины являются слабые антиоксиданты, эффективность которых определяется скорее высоким общим содержанием, чем высокой индивидуальной активностью.

Таким образом, механоактивация коры осины является эффективным методом интенсификации экстракции антиоксидантных компонентов и увеличения их суммарного выхода, однако существенно не меняет природу доминирующих ингибиторов, характеризующихся низкой удельной реакционной способностью.

Выводы

Электронно-микроскопические исследования показали, что минимальный размер частиц после механоактивации сырья составляет 55 нм. Количество частиц диаметром 98 нм, полученных при обработке в течение 5 мин при разных скоростях реакторов, практически одинаково.

Механоактивация сырья при разных условиях существенно увеличивает выход полифенолов (прирост до 61,5 %). Количество водно-спиртовых веществ также возрастает на 40–44 % при диспергировании в течение 5–10 мин и скорости вращения реакторов 1820 об/мин.

В большей степени механоактивация коры осины влияет на экстракцию водорастворимых веществ. Максимальный выход получен при механоактивации сырья в планетарной мельнице в течение 3–5 мин при скоростях вращения реакторов 1395 и 1820 об/мин. Дальнейшее увеличение времени механического воздействия снижает количество извлеченных водорастворимых веществ и сопровождается ростом затрат на производство биологически активных веществ.

Наибольший выход салицина при механоактивации сырья в течение 1–3 мин получен в реакторах, вращающихся со скоростью 1820 об/мин. Дальнейшее увеличение времени обработки (до 5, 7 и 10 мин) не способствует повышению количества извлекаемого салицина. Независимо от времени диспергирования сырья и скорости вращения реакторов его значение остается постоянным. При механоактивации сырья в реакторах со скоростью 1395 об/мин в течение 1–3 мин выход салицина ниже, чем при скорости 1820 об/мин. При времени обработки 5–10 мин количество извлекаемого салицина остается одинаковым.

По данным инфракрасной спектроскопии, механоактивация сырья даже при минимальной скорости вращения оказывает существенное влияние на состав водорастворимых веществ. Диспергирование коры осины в течение 3 мин приводит к значительному

повышению доли углеводной составляющей и гидроксильных групп. При этом уменьшается количество алкильных заместителей. Увеличение содержания кислородсодержащих групп связано с окислением радикалов, образующихся при механоактивации.

Изменения функционального состава водорастворимых веществ из коры осины, обработанной при 1820 об/мин, аналогичны изменениям при обработке сырья в реакторах, вращающихся со скоростью 1395 об/мин.

Механоактивация сырья усиливает антиоксидантные свойства водорастворимых веществ. Максимальное содержание антиоксидантов отмечено во фракциях, экстрагированных из коры осины, обработанной в течение 5 мин.

Таким образом, применение механоактивации сырья – коры *Populus tremula* L. – позволит решить ключевую технологическую проблему извлечения ценных биологически активных веществ из сложных по химической и структурной организации растительных матриц и, соответственно, более полно использовать возобновляемое растительное сырье, повышая комплексность и экологичность лесопользования.

С учетом достижений в области переработки минерального сырья дальнейшие исследования будут направлены на оптимизацию энергозатрат при переработке растительных материалов (в частности, коры *Populus tremula* L.) с целью определения технологически и экономически обоснованного предела ее измельчения.

Критерии авторства

В. П. Сергун – проведение экспериментальных исследований, верификация полученных данных. М. М. Шамова – руководство экспериментальными исследованиями. В. М. Позняковский – методология исследования и консультации в ходе эксперимента. И. Ю. Сергеева – поиск источников и написание рукописи.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution

V.P. Sergun conducted the experimental studies and verified the obtained data. M.M. Shamova supervised the experimental studies. V.M. Poznyakovsky designed the research methodology and provided consultations. I.Yu. Sergeeva provided literary sources and wrote the manuscript.

Conflict of interest

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

Список литературы / References

1. Sharifi-Rad J, Kumar NVA, Zucca P, Varoni EM, Dini L, *et al.* Lifestyle, oxidative stress, and antioxidants: Back and forth in the pathophysiology of chronic diseases. *Frontiers in Physiology*. 2020;11:694. <https://doi.org/10.3389/fphys.2020.00694>
2. Rahaman MM, Hossain R, Herrera-Bravo J, Islam MT, Atolani O, *et al.* Natural antioxidants from some fruits, seeds, foods, natural products, and associated health benefits: An update. *Food Science & Nutrition*. 2023;11(4):1657–1670. <https://doi.org/10.1002/fsn3.3217>
3. Aurori M, Niculae M, Hanganu D, Pall E, Cenariu M, *et al.* The Antioxidant, antibacterial and cell-protective properties of bioactive compounds extracted from rowanberry (*Sorbus aucuparia* L.) fruits *in vitro*. *Plants*. 2024;13(4):538. <https://doi.org/10.3390/plants13040538>
4. 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>
5. Sukhikh S, Babich O, Prosekov A, Patyukov N, Ivanova S. Future of chondroprotectors in the treatment of degenerative processes of connective tissue. *Pharmaceuticals (Basel)*. 2020;13(9):220. <https://doi.org/10.3390/ph13090220>
6. Babich O, Prosekov A, Zaushintsena A, Sukhikh A, Dyshlyuk L, Ivanova S. Identification and quantification of phenolic compounds of Western Siberia *Astragalus danicus* in different regions. *Heliyon*. 2019;5(8):e02245. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02245>
7. Кожевников А. Ю., Шестаков С. Л., Сыпалова Ю. А. Вопросы структурной организации лигнина и перспективы его переработки. *Химия растительного сырья*. 2023. № 2. С. 5–26. [Kozhevnikov AY, Shestakov SL, Sypalova YuA. Lignin: Structural organization and processing prospects. *Chemistry of Plant Raw Materials*. 2023;(2):5–26. (In Russ.)] <https://doi.org/10.14258/jcpm.20230211737>
8. Куркин В. А. Актуальные аспекты стандартизации сырья и препаратов, содержащих фенольные соединения. *Вестник Научного центра экспертизы средств медицинского применения. Регуляторные исследования и экспертиза лекарственных средств*. 2022. Т. 12. № 2. С. 127–141. [Kurkin VA. Relevant aspects of standardisation of plant raw materials and herbal medicinal products containing phenolic compounds. *The Bulletin of the Scientific Centre for Expert Evaluation of Medicinal Products. Regulatory Research and Medicine Evaluation*. 2022;12(2):127–141. (In Russ.)] <https://doi.org/10.30895/1991-2919-2022-12-2-127-141>
9. Сёмушкин Д. Н., Зиганшин Б. Г., Сёмушкин Н. И., Дмитриев А. В., Максимов И. И. и др. Методы интенсификации процессов экстрагирования биологически активных веществ из растительного сырья. *Вестник Курганской ГСХА*. 2023. № 1. С. 78–88. [Semushkin DN, Ziganshin BG, Semushkin NI, Dmitriev AV, Maksimov II, *et al.* Methods for intensification of extraction processes biologically active substances from plant raw materials. *Vestnik Kurganskoy GSHA*. 2023;1: 78–88. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/ZXPZCV>
10. Николаева И. Г., Цибиктарова Л. П. Механоактивация растительного сырья пятилистника кустарникового и толокнянки обыкновенной с добавками. *Вестник Бурятского государственного университета. Медицина и фармация*. 2024. № 3. С. 65–70. [Nikolaeva IG, Tsibiktarova LP. Mechanical Activation of the Herbal Substances of *Potentilla fruticosa* and *Arctostaphylos uva-ursi* Shoots with Additives. *Bulletin of Buryat State University. Medicine and Pharmacy*. 2024;(3):65–70. (In Russ.)] <https://doi.org/10.18101/2306-1995-2024-3-65-70>
11. Krakowska-Sieprawska A, Kielbasa A, Rafińska K, Ligor M, Buszewski B. Modern Methods of Pre-Treatment of Plant Material for the Extraction of Bioactive Compounds. *Molecules*. 2022;23:730. <https://doi.org/10.3390/molecules27030730>
12. Просин М. В., Бородулин Д. М., Сафонова Е. А., Головачева Я. С. Исследование эффективности экстрагирования в различных типах аппаратов при использовании растительного сырья чаги, корня копецечника, плодов шиповника. *Вестник КрасГАУ*. 2021. № 6. С. 170–175. [Prosin VM, Borodulin DM, Safonova EA, Golovacheva YaS. Study of the extraction efficiency in various types of apparatus using plant materials of chaga, kopeck root, rose hips. *Bulletin of KrasSAU*. 2021;(6):170–175 (In Russ.)] <https://doi.org/10.36718/1819-4036-2021-6-170-175>
13. El-Eskandarany MS. *Mechanical alloying: Energy storage, protective coatings, and medical applications*. Elsevier. New York: William Andrew; 2020. 441 p.
14. Matveeva AG, Skripkina TS, Nekrasov VM, Nikiforova UE, Bukhtoyarov VA, *et al.* Particle aggregation and the grinding limit in high energy ball mill. *Powder Technology*. 2024;449:120370. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2024.120370>
15. Zhu Zh, Gao Sh, Chen Ch, Xu W, Xiao P, *et al.* The natural product salicin alleviates osteoarthritis progression by binding to IRE1 α and inhibiting endoplasmic reticulum stress through the IRE1 α -I κ B α -p65 signaling pathway. *Experimental & Molecular Medicine*. 2022;(11):1927–1939. <https://doi.org/10.1038/s12276-022-00879-w>
16. Jiang Y, Hou J, Liu C, Zhao C, Xu Y, *et al.* Inhibitory effect of salicin on *Staphylococcus aureus* coagulase. *Chem-MedChem*. 2023;(22):e202300302. <https://doi.org/10.1002/cmdc.202300302>
17. Ahn S-Y, Kim KA, Lee S, Kim KH. Potential skin anti-aging effects of main phenolic compounds, tremulacin and tremuloidin from *Salix chaenomeloides* leaves on TNF- α -stimulated human dermal fibroblasts. *Chemico-Biological Interactions*. 2024;402:111192. <https://doi.org/10.1016/j.cbi.2024.111192>
18. Wu PQ, Li Y, Ren YH, Zhou JS, Liu QF, *et al.* Anti-inflammatory salicin derivatives from the barks of *Salix tetrasperma*. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2024;16. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.4c01061>

19. Лоскутов С. Р., Шапченко О. А., Анискина А. А., Пастори З. Гигроскопические свойства древесины лиственных пород. Лесной Вестник. 2022. Т. 26. № 2. С. 92–102. [Loskutov SR, Shapchenko OA, Aniskina AA, Pastori Z. Hygroscopic properties of hardwoods. Forestry Bulletin. 2022;26(2):92–102. <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2022-2-92-102>
20. Варданян Л. Р., Арутюнян С. А., Торосян Г. О. Исследование антиоксидантной активности растительного сырья как натурального стабилизатора пищевых продуктов. Техника и технология пищевых производств. 2025. Т. 55. № 3. С. 485–495. [Vardanyan LR, Harutyunyan SA, Torosyan GO. Antioxidant activity of plant raw materials as natural food stabilizers. Food Processing: Techniques and Technology. 2025;55(3):485–495. (In Russ.)] <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2025-3-2586>
21. Manousi N, Rosenberg E, Deliyanni E, Zachariadis GA, Samanidou V. Magnetic solid-phase extraction of organic compounds based on graphene oxide nanocomposites. Molecules. 2020;25(5):1148. <https://elibrary.ru/ZIXMDZ>
22. Лапшин О. В., Болдырева Е. В., Болдырев В. В. Роль смешения и диспергирования в механохимическом синтезе (обзор). Журнал неорганической химии. 2021. Т. 66. № 3. С. 402–424. [Lapshin OV, Boldyreva EV, Boldyrev VV. The role of mixing and dispersion in mechanochemical synthesis (review). Journal of Inorganic Chemistry. 2021;66(3):402–424. (In Russ.)] <https://doi.org/10.31857/S0044457X21030119>
23. Jiang W, Adamopoulos S, Hosseinpourpia R, Žigon J, Petric M, *et al.* Utilization of partially liquefied bark for production of particleboards. Applied Sciences. 2020;10:5253. <https://doi.org/10.3390/app10155253>
24. Sillero L, Prado R, Labidi J. Simultaneous microwave-ultrasound assisted extraction of bioactive compounds from bark. Chemical Engineering and Processing – Process Intensification. 2020;156:108100. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2020.108100>
25. Валеев К. В., Зиятдинова Д. Ф., Сафин Р. Г. Обзор исследований в области извлечения биологически активных веществ из хвойных пород древесины. Системы. Методы. Технологии. 2024. № 4. С. 159–164. [Valeev KV, Ziatdinova DF, Safin RG. Review of research in the field of extraction of biologically active substances from coniferous wood species. Systems. Methods. Technologies. 2024;(4):159–164. (In Russ.)] <https://doi.org/10.18324/2077-5415-2024-4-159-164>
26. Elbendari AM, Ibrahim SS. Optimizing key parameters for grinding energy efficiency and modeling of particle size distribution in a stirred ball mill. Scientific Reports. 2025;15(1):3374. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-87229-8>
27. Soares WS, Magalhães EdS, Govender N. Enhancing particle breakage and energy utilization in ball mills: An integrated DEM and SPH approach. Mining. 2025;5:18. <https://doi.org/10.3390/mining5010018>

Дополнительная информация об авторах / Additional information about the authors

Сергун Валерий Петрович / Valery P. Sergun ORCID 0009-0003-6368-9992; eLIBRARY SPIN 7538-0687
Шамова Мария Михайловна / Maria M. Shamova ORCID 0000-0001-7257-8838; eLIBRARY SPIN 7560-5507
Позняковский Валерий Михайлович / Valery M. Poznyakovsky ORCID 0000-0001-7034-4675; eLIBRARY SPIN 6416-0515
Сергеева Ирина Юрьевна / Irina Yu. Sergeeva ORCID 0000-0002-1686-0131; eLIBRARY SPIN 4207-9166

<https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-1-2626>
<https://elibrary.ru/BUTOEU>

Оригинальная статья
<https://fptt.ru>

Детерминанты и поведенческие особенности при выборе молока потребителями на региональном рынке Крыма



Н. Н. Калькова*, О. Б. Ярош, С. Е. Бабак

Крымский федеральный университет им. В. И. Вернадского, Симферополь, Россия

Поступила в редакцию: 26.08.2025

Принята после рецензирования: 23.09.2025

Принята к публикации: 13.01.2026

*e-mail: nkalkova@yandex.ru

© Н. Н. Калькова, О. Б. Ярош, С. Е. Бабак, 2026



Аннотация.

Молоко как базовый продукт питания требует особого внимания к качеству и безопасности на всех этапах производства. В условиях роста конкуренции на рынке молочной продукции и увеличения доли региональных брендов актуальной задачей становится изучение факторов потребительского выбора. Цель исследования – выявить ключевые детерминанты предпочтений потребителей и оценить потенциал региональных брендов питьевого молока.

Объектами исследования являлись молочные продукты местных производителей Республики Крым, включая пастеризованное молоко и иную продукцию, реализуемые в различных видах потребительской упаковки. Эмпирическую базу составили результаты двухэтапного опроса потребителей ($n_1 = 400$; $n_2 = 300$) с использованием случайной выборки. Для обработки данных применялись методы описательной и многомерной статистики, в том числе факторный анализ с вращением Варимакс и агломеративный кластерный анализ с использованием пакета SPSS 23.0.

В результате исследования выявлены значимые гендерные различия в факторах выбора: мужчины чаще ориентируются на вкус, цену, жирность и срок годности (47 % объясненной дисперсии), тогда как женщины уделяют большее внимание составу, соответствию ГОСТ и местному производству (53 %). Факторный анализ позволил идентифицировать двухэтапную модель потребительского выбора, где на когнитивной стадии доминируют параметры безопасности ($R^2 = 0,834$), а на финальной стадии – имиджево-ассортиментные характеристики ($R^2 = 0,794$). Установлено, что цена является индикатором ожидаемого качества при выборе между брендами, но на макроуровне выступает детерминантом доступности, о чем свидетельствует устойчивая отрицательная корреляция между динамикой цен и объемами потребления в период 2016–2023 гг. Кластерный анализ позволил выделить три группы брендов по степени восприятия: массовые, промежуточные и нишевые.

Практическая значимость исследования заключается в разработке дифференцированных маркетинговых стратегий для региональных производителей молочной продукции с учетом выявленных потребительских предпочтений. Результаты могут быть использованы при формировании программ поддержки местных брендов и стимулирования спроса на молочную продукцию. Перспективным направлением дальнейших исследований является изучение влияния сенсорных характеристик продукции на лояльность к региональным брендам.

Ключевые слова. Молоко, потребительское поведение, гендерные особенности, региональный бренд, факторы выбора, вкус, качество

Финансирование. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-28-20286, <https://rscf.ru/project/25-28-20286/>

Для цитирования: Калькова Н. Н., Ярош О. Б., Бабак С. Е. Детерминанты и поведенческие особенности при выборе молока потребителями на региональном рынке Крыма. Техника и технология пищевых производств. 2026. Т. 56. № 1. С. 135–153. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-1-2626>

Factors and Behavioral Patterns of Milk Consumption in the Crimea



Natalia N. Kalkova*, Olga B. Yarosh, Svetlana E. Babak

Crimean Federal University, Simferopol, Russia

Received: 26.08.2025
Revised: 23.09.2025
Accepted: 13.01.2026

*e-mail: nkalkova@yandex.ru
© N.N. Kalkova, O.B. Yarosh, S.E. Babak, 2026



Abstract.

As a staple food product, milk requires special standards of quality and safety at all production stages. As cross-regional competition in the dairy sector continues to escalate, understanding consumer behavior is now a critical priority for domestic market studies. This article describes the drivers that determine consumer behavior on regional dairy markets in Russia.

The research featured milk and other dairy products produced in the Republic of Crimea, Russia. The empirical research relied on a two-stage consumer survey ($n_1 = 400$; $n_2 = 300$) using a random sample. The statistical approach employed descriptive and multivariate techniques, e.g., factor analysis with Varimax rotation and agglomerative hierarchical clustering (SPSS 23.0). The study revealed significant gender differences in the factors of choice. Men focused on the taste, price, fat content, and shelf life (47%) while women paid more attention to the composition, compliance with state standards, and local production (53%). The factor analysis made it possible to identify a two-stage model of consumer choice, where safety parameters dominated at the cognitive stage ($R^2 = 0.834$), and image-assortment properties prevailed at the final stage ($R^2 = 0.794$). Price proved to be a major quality indicator when choosing between brands. At the macro level, however, price served as a determinant of accessibility, as evidenced by a reliable negative correlation between price dynamics and consumption volumes in 2016–2023. The cluster analysis revealed three groups of brands based on the degree of perception: mass brands, intermediate brands, and niche brands.

The differentiated regional marketing strategies based on consumption patterns can be used to support local brands and stimulate demand for local dairy products. The effect of sensory properties on loyalty to regional brands is a promising research direction.

Keywords. Milk, consumer behavior, gender patterns, regional brand, choice factors, taste, quality

Funding. The research was supported by the Russian Science Foundation, grant no. 25-28-20286, <https://rscf.ru/en/project/25-28-20286/>

For citation: Kalkova NN, Yarosh OB, Babak SE. Factors and Behavioral Patterns of Milk Consumption in the Crimea. Food Processing: Techniques and Technology. 2026;56(1):135–153. (In Russ.) <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-1-2628>

Введение

Развитие молочной промышленности в Республике Крым является стратегическим приоритетом региональной экономической политики. Модернизация данного сектора способна обеспечить устойчивый рост агропродовольственного комплекса и повысить инвестиционную привлекательность региона за счет мультипликативного эффекта. Стимулирование молочной индустрии активизирует смежные отрасли: кормопроизводство, специализированное машиностроение, логистику и торговлю. Кроме того, наращивание мощностей молочной переработки несет в себе значительный социально-экономический потенциал. Оно способствует созданию новых рабочих мест и комплексному развитию сельских территорий, что напрямую влияет на качество жизни населения. В долгосрочной перспективе трансформация производственных систем, основанная на диверсификации доходов сельских сообществ и углублении кооперационных связей

между участниками молочной экосистемы, обеспечивает конкурентоспособность сектора. Это создает основу для формирования узнаваемых региональных брендов и справедливого распределения добавленной стоимости между всеми стейкхолдерами [1].

Для минимизации негативных внешних эффектов и создания дополнительных конкурентных преимуществ, способствующих укреплению имиджа региона в Крыму, в период 2014–2023 гг. реализован ряд инвестиционных проектов в молочной отрасли: модернизация животноводческих комплексов (Симферопольский район), реконструкция перерабатывающих предприятий (Раздольненский район) и внедрение инновационных технологий кормопроизводства (Красногвардейский район). Согласно данным Министерства сельского хозяйства Республики Крым, реализация указанных мер позволила увеличить производственные мощности до 150 т молочной продукции в сутки, что обеспечило технологическую модерни-

зацию отрасли и повышение конкурентоспособности региональной молочной продукции.

Молочная отрасль Крыма представлена 24 предприятиями, при этом 90 % объема производства обеспечивают пять из них: ООО «Новатор» (г. Джанкой), ООО ДК «Мегатрейд-Юг» (г. Саки), ООО «Юг-молоко» (Раздольненский район), ООО «Крымский молочник» (Красногвардейский район) и ООО «Черноморский завод продтоваров» (Черноморский район). Выпускаемая продукция включает молочные, кисломолочные изделия, сыры и творожные продукты. За период 2014–2022 гг. в молочной отрасли наблюдалась положительная динамика производства основных видов продукции. Объемы выпуска молока возросли в 2,5 раза, сливочного масла – в 2 раза, творога – в 3 раза, кисломолочной продукции – в 4 раза. Значительный рост зафиксирован в производстве сухого обезжиренного молока, которое к 2021 г. увеличилось на 100 %, достигнув 1,2 тыс. т. Основными предприятиями, обеспечившими этот прирост, стали ООО «Новатор» и «Юг-молоко» [2]. Согласно данным Управления Федеральной службы государственной статистики по Республике Крым и г. Севастополя, в 2024 г. тенденция к увеличению производства сохранилась: выпуск молока вырос на 14,6 % по сравнению с предыдущим периодом, составив 27258,4 т, производство кисломолочных продуктов увеличилось на 13,5 % (21761,0 т), сметаны – на 6,1 % (6576,1 т). Однако на фоне общего роста наблюдалось снижение выпуска отдельных видов продукции: производство сливочного масла сократилось на 9,8 % (до 3013,7 т), сыра – на 12,5 % (до 3195,1 т). Такая диверсификация динамики производства свидетельствует о структурных изменениях в потребительском спросе и возможной переориентации предприятий на выпуск более востребованных видов молочной продукции.

Уникальные агроклиматические условия региона, включающие оптимальное сочетание температурного режима, продолжительности вегетационного периода и биоразнообразия естественных кормовых угодий, создают предпосылки для производства молочной продукции в Крыму с особыми качественными характеристиками. Как показано в работах [3, 4], обогащение молока ценными питательными веществами и формирование его уникальных органолептических свойств создают предпосылки для производства продуктов с улучшенными функциональными характеристиками. Это соответствует мировому тренду на экологически чистую продукцию, подчеркивая связь продукта с местом происхождения сырья, что, в свою очередь, формирует основу для создания узнаваемого территориального бренда [5].

На формирование местных брендов молочной продукции, помимо природных и экономических факторов, значительное влияние оказывают социально-демографические условия и семейные традиции потребления. Семья, представляя собой фундаментальную ячейку общества, выполняет двоякую социально-экономичес-

кую функцию: с одной стороны, она служит первичным институтом демографического воспроизводства, с другой – выступает ключевым субъектом потребительской активности, формирующим устойчивые модели рыночного поведения. Динамика демографических процессов, включая изменения в структуре и численности семей, непосредственно отражается на характере спроса и моделях совместного потребления продовольствия, поскольку члены семьи, как правило, объединяют свои доходы, покупая товары сообща и проявляя сходные пищевые предпочтения [6]. Это формирует устойчивый спрос на определенные категории продуктов и создает рыночную нишу для локальных производителей. Особенно ярко данная закономерность проявляется в регионах с выраженной этнокультурной спецификой, где семейные традиции питания тесно переплетены с местной гастрономической культурой [7]. В таких условиях именно семья выступает основным институтом трансляции пищевых привычек: семейные практики приобретают особую значимость, поскольку именно в семье закладываются устойчивые модели потребительского поведения, передающиеся из поколения в поколение [8]. При этом, согласно исследованиям П. Бурдые, даже повышение дохода и увеличение стоимости и качества пищи не характеризует изменение привычек и вкусов [9]. Для локальных производителей ориентация на глубинные культурные паттерны открывает возможность создания специализированных этнобрендов [10]. Трансформируя традиционные продукты в товары, подчеркивающие связь с местной идентичностью и семейными ценностями, производители получают устойчивое преимущество и формируют собственную рыночную нишу. Такие этнобренды, включающие аутентичные пищевые продукты, изделия декоративно-прикладного искусства и сувенирную продукцию, созданную по традиционным технологиям из местного сырья, выполняют две ключевые задачи: во-первых, они удовлетворяют повседневные потребности семьи, во-вторых, выступают маркерами культурной принадлежности. Как отмечает Э. Гидденс, именно через такие повседневные практики потребления проявляются базовые принципы социальной организации, формируя устойчивые структуры экономического поведения [11].

Формирование пищевых предпочтений в детском и подростковом возрасте представляет собой сложный многофакторный процесс, находящийся под влиянием биологических факторов: генетически обусловленных вкусовых особенностей [12], социально-культурных условий, включая семейные традиции и доступность продуктов, и религиозно-культурных норм, определяющих систему гастрономических запретов [8]. Указанные факторы в долгосрочной перспективе влияют на здоровье и развитие человека и способствуют формированию общего культурного кода, опосредующего гастрономическое общение между различными группами. Дети формируют свои пищевые привычки

через непосредственный опыт потребления различных продуктов: посредством наблюдения и подражания пищевому поведению родителей и значимых взрослых. Это составляет основу базовых пищевых предпочтений, которые демонстрируют высокую устойчивость и сохраняются во взрослом возрасте [13]. Негативный первый опыт знакомства с продуктом, ограниченное разнообразие рациона или неправильные пищевые привычки могут привести к формированию устойчивой неприязни к определенным видам пищи, в то время как грамотное введение новых продуктов в рацион создает основу для формирования здоровых пищевых привычек. Поскольку семейные потребительские практики не существуют изолированно, семья как социальный институт выполняет не только функцию биологического и культурного воспроизводства, но и играет ключевую роль в формировании экономических паттернов, выступая важным звеном между макроэкономическими процессами и индивидуальным спросом.

Молочная промышленность, способствуя обеспечению продовольственной безопасности региона, предоставляет населению доступ к жизненно важным продуктам питания, являющимся источником различных макро- и микроэлементов, которые обеспечивают улучшение питания, поддержание правильного обмена веществ и функционирования организма [14]. Среди коммерчески значимых видов молока доминирующее положение занимает коровье, составляющее около 83 % от общего объема мирового производства и потребления [15]. Как отмечают исследователи [16], уровень потребления продуктов питания служит ключевым индикатором качества жизни, непосредственно отражая степень удовлетворения фундаментальных потребностей человека, и влияет на здоровье, работоспособность и эмоциональное состояние населения.

Рекомендуемая норма потребления молока и молочных продуктов в России составляет 340 кг в год на человека, что на 20 кг выше, чем десятилетие назад [17]. Однако фактическое потребление остается ниже нормы: в среднем по России в 2023 г. данный показатель составлял 261 кг (76,8 % от нормы), в Республике Крым – 225,3 кг (66,3 % от нормы; 86,3 % от среднероссийского уровня потребления). Несмотря на активное развитие инвестиционных проектов и институциональные меры

поддержки молочной отрасли, динамика потребления молока в период 2016–2023 гг. ухудшается как в целом по России, так и в Республике Крым (табл. 1).

Анализ динамики потребления молока и молочных продуктов за период 2016–2023 гг. выявил существенные различия между показателями Республики Крым и общероссийскими данными. В Крыму наблюдается устойчивая негативная тенденция: за исследуемый период объем потребления сократился с 268,9 кг до 225,3 кг на человека в год, что составило снижение на 43,6 кг (16,2 %). При этом наблюдается ускорение темпов снижения в последние годы: после относительной стабилизации в 2016–2018 гг., когда колебания происходили в пределах 3,6 кг, с 2019 г. началось резкое падение потребления, продолжающееся и в настоящее время. Если в 2016 г. разрыв между крымскими и среднероссийскими показателями составлял 4,1 кг, то к 2023 г. эта разница увеличилась до 35,7 кг. Общероссийская динамика потребления молока более стабильна: за анализируемый период потребление сократилось лишь на 12 кг (4,4 %), показатели колеблются в пределах 261–273 кг без выраженной тенденции к постоянному снижению. Особого внимания заслуживает сравнение темпов снижения потребления: если в Крыму среднегодовое снижение составляет около 6,2 кг, то в целом по России – 1,7 кг. Это означает, что кризис потребления молочной продукции в Крыму развивается почти в четыре раза быстрее, чем в среднем по стране.

Негативная тенденция снижения потребления молочных продуктов, которая наблюдается в последние годы в России и отдельных регионах (Республика Крым, Кемеровская область – Кузбасс [16]), является частью глобального тренда, подтвержденного многочисленными эпидемиологическими исследованиями. Согласно международным диетологическим рекомендациям, оптимальный уровень потребления различных молочных продуктов составляет 2–3 порции в сутки [17], но реальные показатели существенно отстают от нормативов. Результаты исследований в США (NHANES 1989–2008 гг.) демонстрируют статистически значимое снижение суточного потребления молока среди молодежи с 218 до 170 ккал [18], и лишь 15 % населения старше 2 лет соблюдают диетологические рекоменда-

Таблица 1. Динамика среднего потребления молока и молочных продуктов по России и в Республике Крым за период 2016–2023 гг.*

Table 1. Average dairy consumption in Russia and the Republic of Crimea, 2016–2023*

Годовое потребление, кг/человека	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Россия в целом	273,0	266,0	266,0	267,0	271,0	265,0	264,0	261,0
Республика Крым	268,9	267,4	265,3	258,0	253,1	245,0	235,9	225,3

Примечание: * – таблица составлена авторами на основании статистических данных Федеральной службы государственной статистики (Росстат) и Управления Федеральной службы государственной статистики по Республике Крым и г. Севастополю.

Note: * – table 1 features statistical data from the Federal State Statistics Service (Rosstat) and the Office of the Federal State Statistics Service for the Republic of Crimea and Sevastopol.

ции по молочным продуктам, при среднем показателе потребления 1,9 порции [19]. Тенденция снижения потребления молочной продукции особенно выражена в регионах Ближнего Востока. Несмотря на наличие крупных производителей (Iran Dairy Industries Company), уровень потребления молочных продуктов на душу населения остается критически низким – 60 кг/год. (2014 г.), что составляет лишь 50 % от среднемирового показателя [20].

Недостаточное потребление молочных продуктов негативно сказывается на физиологическом развитии и здоровье человека. Наиболее выраженные последствия связаны с нарушениями костного метаболизма: снижение минерализации костной ткани в детском и подростковом возрасте повышает риск развития остеопороза в зрелом периоде. Отдельного внимания заслуживает влияние молочного дефицита на когнитивное развитие детей. Исследования фиксируют корреляцию между недостаточным потреблением молочных продуктов и снижением академической успеваемости, что объясняется дефицитом микронутриентов, критически важных для нейрокогнитивного развития [21]. Также отмечается взаимосвязь между низким уровнем потребления молочных продуктов и нарушениями соматического развития: замедление роста, повышенная частота стоматологических заболеваний. Данные нарушения обусловлены комплексным дефицитом кальция, витамина D и фосфопептидов, участвующих в процессах остеогенеза и дентиногенеза [22]. Таким образом, ограниченное потребление молочной продукции выступает значимым фактором риска развития широкого спектра заболеваний у наиболее уязвимых слоев населения.

Сложившаяся ситуация требует комплексного изучения причин снижения потребления молочной продукции в регионе, включая анализ поведенческих факторов, определяющих потребительский выбор. В результате актуальным является необходимость системного исследования традиционных пищевых предпочтений крымских семей, гендерных особенностей формирования молочного рациона и восприятия местными потребителями различных товарных категорий молочной продукции. Важным направлением представляется выявление наиболее перспективных региональных

брендов, обладающих потенциалом для повышения лояльности местного населения. Анализ позволит выявить не только объективные качественные характеристики продукции (органолептические свойства, состав, технологию производства), но и субъективные аспекты восприятия – эмоциональную привязанность к традиционным наименованиям, ассоциации с местной гастрономической культурой, уровень доверия к производителям. Особую значимость приобретает изучение межпоколенческой динамики потребления, позволяющее разработать меры поддержки потребления, которые учитывают конкурентные преимущества региональной продукции, сложившиеся пищевые привычки, особенности регионального рынка и формирующиеся паттерны потребления у целевой аудитории.

Исследование продолжает цикл работ, посвященных изучению детерминант потребления молочных продуктов, с акцентом на социальные и поведенческие аспекты пищевого выбора [23]. В контексте наблюдаемого глобального снижения потребления молочной продукции особую научную и практическую значимость приобретает комплексный анализ мотивационных факторов, стимулирующих регулярное потребление молочных продуктов, и барьеров, ограничивающих их включение в рацион питания населения.

Цель исследования – выявить ключевые детерминанты предпочтений потребителей и оценить потенциал региональных брендов питьевого молока.

Объекты и методы исследования

Объекты исследования – молочная продукция региональных брендов Крыма и питьевое молоко как наиболее предпочитаемый вид.

Для оценки психографических факторов, характеризующих поведение потребителей при выборе молока использовался метод интернет-опроса в процессе первого ($n = 400$) и второго ($n = 300$) этапов, осуществленных в период 2024–2025 гг., с применением онлайн-платформы Google Forms, профиль респондентов представлен в таблице 2. Анкетирование проводилось путем распространения уникальных ссылок на опрос через таргетированные рекламные объявления в социальных сетях и в региональных интернет-сообществах, ориентированных на жителей Крыма.

Таблица 2. Социально-демографический профиль респондентов

Table 2. Respondents by key socio-demographic indicators

Переменная	Категория	Первый этап ($n = 400$)		Второй этап ($n = 300$)	
		Количество по выборке		Количество по выборке	
		человек	%	человек	%
Пол	Мужчины	213	53,3	150	50,0
	Женщины	177	46,7	150	50,0
Возраст	18–35	186	46,5	132	44,0
	36–55	151	37,8	101	33,7
	46–75	63	15,8	67	22,3

Для обеспечения репрезентативности выборки применялась квотная стратификация по полу и возрастным группам, параметры которой установлены в соответствии с официальными статистическими данными Территориального органа Федеральной службы государственной статистики по Республике Крым. Сформированная выборочная совокупность практически полностью соответствует ключевым социально-демографическим характеристикам генеральной совокупности взрослого населения региона.

На первом этапе с целью изучения потребительских предпочтений в отношении молочной продукции крымских производителей проведен онлайн-опрос, в котором приняли участие 400 человек ($n = 400$). Респонденты могли выбрать несколько товарных наименований из перечня и указать продукты, не вошедшие в базовый перечень. Данный подход позволил выявить региональную специфику потребления: такие традиционные для крымского рынка продукты, как айран, тан, простокваша и мацони, систематизированы в укрупненную категорию «Другие кисломолочные продукты». Дополнительной задачей этапа стало выявление наиболее предпочитаемых брендов в самой большой группе молочных продуктов.

Второй этап ($n = 300$) был посвящен углубленному анализу потребительского поведения при выборе питьевого пастеризованного молока региональных брендов в мягкой упаковке. Изучали ключевые факторы выбора: влияние бренда, параметров упаковки, места производства и ценовой восприимчивости. Выбор мягкой упаковки молока обусловлен представленностью всех брендов и относительно невысокой ценой.

Объем выборки с учетом статистических принципов и характеристик генеральной совокупности рассчитан по формуле:

$$n = \frac{z^2 \times p \times (1 - p)}{e^2}$$

где $z = 1,96$ (для 95 % доверительного уровня; $p = 0,5$ (доля признака, обеспечивающая максимальный размер выборки); $e = 0,05$ (погрешность выборки – ± 5 %, приемлемый уровень для исследований потребительского поведения); $n \approx 1,9$ млн человек (генеральная совокупность – взрослое население Крыма).

Таким образом, рассчитанный минимальный репрезентативный объем выборки составил 385 человек. При этом указанный объем выборки на первом этапе ($n = 400$) полностью удовлетворял требованиям даже после исключения нерепрезентативных анкет (с неполными ответами, противоречивыми данными или отклонениями от критериев целевой аудитории). Объем выборки на втором этапе ($n = 300$) приемлем для качественных исследований, в рамках которых акцент делается на глубинный анализ поведения подгрупп в рамках первичной репрезентативной выборки (при проведении исследований предпочтений по брендам или упаковке).

На третьем этапе исследования для выявления однородных групп потребителей по схожим паттернам предпочтений применяли агломеративный иерархический кластерный анализ с использованием метода средних межгрупповых связей на основе матрицы квадратов евклидовых расстояний, рассчитанной по ключевым факторам выбора молочной продукции. В качестве входных переменных использовались выявленные в ходе опроса ($n = 300$) 13 значимых факторов, влияющих на потребительское поведение.

Валидность инструментария исследования обеспечивалась проверкой внутренней согласованности шкал через коэффициент α -Кронбаха ($> 0,7$), что подтвердило релевантность включенных в опросник суждений и статистическую надежность выявленных закономерностей потребительского поведения.

Результаты анализа позволили ранжировать значимость различных факторов, влияющих на потребительский выбор молочной продукции. Для выявления устойчивых взаимосвязей между ключевыми факторами потребительского выбора молока осуществлен корреляционный анализ (коэффициент Пирсона, $p < 0,010$).

Для идентификации переменных, значимых на разных этапах выбора молока, проведен факторный анализ значимых детерминантов. Использовалось вращение Варимакс (VER) с нормализацией Кайзера, процедура включала три этапа: предварительную обработку данных, снижение размерности методом главных компонент и вращение выделенных компонент.

Для оценки значимости факторов, влияющих на выбор молока в мягкой упаковке в иерархии потребительского поведения, применен множественный линейный регрессионный анализ, позволяющий определить вклад каждого фактора в прогнозирование общей оценки важности.

С целью верификации полученных результатов и комплексной оценки рыночного позиционирования брендов использован метод иерархической агломеративной кластеризации. Данный подход, основанный на матрице квадратов евклидовых расстояний, позволил количественно оценить степень сходства между брендами по совокупности анализируемых параметров, выявить устойчивые кластерные структуры в потребительском восприятии и визуализировать иерархию взаимосвязей между брендами через дендрограмму.

Все статистические процедуры последовательно реализованы в пакете SPSS Statistics 23.0, что обеспечило обоснованность выводов о потребительских предпочтениях и рыночном позиционировании региональных брендов молока.

Гипотезами исследования выступали: H_1 – имеются гендерные различия при выборе наиболее предпочитаемых молочных продуктов; H_2 – имеются статистические различия влияния пола респондентов и типа оцениваемого фактора (вкус, цена, состав и др.) на общую потребительскую оценку важности характеристик продукта; H_3 – существуют статистические различия

в гендерно-специфичных паттернах потребительского поведения при выборе молока; H_4 – семейные традиции потребления оказывают влияние на выбор товаров.

Результаты и обсуждение

С целью изучения потребительских предпочтений в отношении молочной продукции крымских производителей респонденты на первом этапе могли выбрать несколько товарных наименований в группе молочных продуктов. Результаты выбора наиболее предпочитаемых товаров в группе молочных продуктов представлены на рисунке 1.

Результаты исследования потребительских предпочтений молочной продукции региональных производителей свидетельствуют о заметной стратификации спроса. В группу высокого спроса (50 % ответивших и более) вошли традиционные продукты: молоко (72,0 %), сметана (63,2 %), творог (56,4 %) и сыр (49,0 %). Средний уровень предпочтений (30–50 % ответивших) характерен для кефира (48,3 %), других кисломолочных продуктов (46,7 %), творожных сырков (41,9 %), йогурта (40,2 %), ряженки (36,1 %). Наименьший спрос зафиксирован на плавленый сыр (35,8 %). Полученные данные подтверждают выводы о выраженной дифференциации потребительских предпочтений в молочном сегменте и устойчивом доминировании молока животного происхождения перед остальными молочными продуктами [23]. Результаты опроса демонстрируют четкую иерархию спроса, где традиционные продукты формируют ядро потребительской корзины, в то время как специализированные кисломолочные продукты занимают нишевые позиции.

Проведенный анализ потребительских предпочтений позволил выделить три ключевых потребительских сегмента. Наиболее многочисленную группу составляют «традиционалисты» – консервативные потребители, предпочитающие базовые молочные продукты, чей выбор мотивирован привычкой, стремлением

к натуральности и универсальностью использования. Второй сегмент – «умеренные экспериментаторы» – демонстрирует открытость к разнообразию в рамках привычных категорий, ценя удобство, вкусовое разнообразие и пользу для желудочно-кишечного тракта. Наименьшую группу образуют «нишевые потребители» с особыми предпочтениями, для которых важны специфический вкус и функциональные свойства продукции.

На рисунке 2 отражены результаты сравнительного анализа потребительских предпочтений мужчин и женщин в сегменте молочных продуктов.

Полученные результаты свидетельствуют о значимых гендерных различиях в потребительских предпочтениях молочной продукции, что согласуется с данными работы [24], где отмечаются выраженные диспропорции в сенсорно-гедонистических паттернах восприятия, которые проявляются в особенностях пищевого поведения и в структуре потребления пищевых продуктов. Женщины, как правило, потребляют больше фруктов, овощей и цельных продуктов, но также любят сладости и выпечку, в то время как мужчины предпочитают жирную и богатую белком пищу, а также алкогольные и подслащенные напитки, что потенциально предрасполагает их к избыточному весу и ожирению [25]. Данные проведенного опроса указывают на то, что женская часть выборки демонстрирует выраженную склонность к традиционным молочным продуктам, что согласуется с результатами исследований гендерных различий при выборе продуктов питания, которые, по мнению авторов, частично объясняются более активным участием женщин в контроле веса, отношением к здоровому питанию и предпочтением более сладких продуктов [24, 25]. Наблюдаются гендерные различия: женщины предпочитают морепродукты и десерты, а мужчины – пикантные закуски [25]. Мужчины-респонденты проявляют повышенный интерес к ферментированным продуктам (кефир,

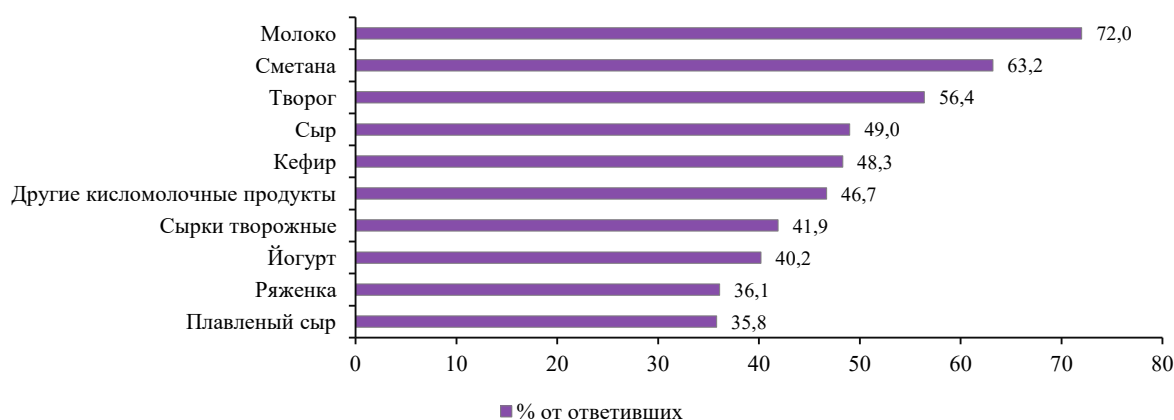
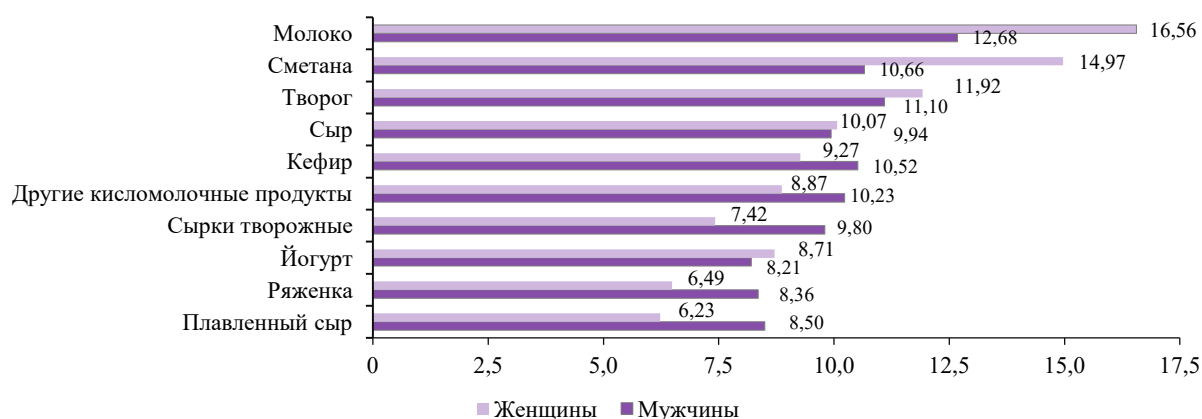


Рисунок 1. Результаты опроса потребительских предпочтений относительно товарных наименований молочной продукции ($n = 400$)

Figure 1. Consumer preferences regarding dairy trade names ($n = 400$)

Рисунок 2. Сравнительный анализ предпочтений мужчин и женщин при выборе молочной продукции ($n = 400$)Figure 2. Gender-based distribution of dairy product preferences ($n = 400$)

ряженка, мацони, айран, тан, простокваша) и модифицированным молочным товарам (творожные сырки, плавленный сыр). Данная закономерность соответствует выводам работы о гендерных особенностях пищевых предпочтений, где мужчины чаще выбирают продукты с выраженными вкусовыми характеристиками [25]. Потребление ферментированных молочных продуктов в регионах Крыма демонстрирует значительное сходство с традициями Центральной Азии, что обусловлено общностью природно-климатических условий, исторически схожим кочевым прошлым и развитием скотоводства. Как и в Центральной Азии, культура питания в Крыму формировалась в условиях засушливого климата с высокими температурами, что делало ферментацию оптимальным технологическим методом биоконсервации скоропортящегося молока [26]. Указанный процесс представлял собой жизненно важную практику, позволявшую значительно увеличить сроки хранения продукта, устранить риск размножения опасных микробов и болезнетворных бактерий и обеспечить доступность питательных веществ в течение длительного времени. Как отмечают G. Konuspayeva *et al.*, сочетание разнообразия видов животных и процесса перехода от одной этнической группы к другой привело к появлению широкого ассортимента кисломолочных продуктов, таких как айран, курт, иримшик, суджук, ряженка, простокваша, тан, кефир, кымыз, шубат, чал или хоормог [26]. Эти продукты выполняли утилитарно-важные функции в повседневной жизни и хозяйственной деятельности: эффективно утоляли жажду в жарком климате, восполняли дефицит питательных веществ и служили идеальными легкими и долгохранящимися пищевыми запасами во время длительных перегонов скота или пребывания в горах, что демонстрирует традицию потребления мацони мужчинами-пастухами на Кавказе.

Кроме того, как было отмечено в работе [25], основное различие между мужчинами и женщинами заключается в их вкусовых оценках: женщины, как пра-

вило, находят более высокие уровни соленого и умами менее приятными, чем мужчины. Поскольку гендерные и связанные с полом установки и мотивации существенно влияют на сенсорно-гедонистические паттерны, пищевое поведение, а также индивидуальные реакции на потребление пищи, женщины, в отличие от мужчин, как правило, предпочитают более низкую концентрацию соли в продукте [25].

Полученные результаты подтверждают гипотезу H_1 о гендерной дифференциации потребительских предпочтений молочной продукции, однако выявленные паттерны требуют более детального анализа когнитивных механизмов, опосредующих восприятие и оценку характеристик при выборе молока.

На втором этапе исследования, учитывая выявленный приоритет питьевого молока как наиболее востребованного продукта в молочной категории, проведен анализ предпочтений потребителей в отношении продукции региональных торговых марок. В ходе исследования респондентам предлагалось выбрать одну или несколько предпочитаемых торговых марок из представленного списка. Это позволило, во-первых, выявить структуру рыночных предпочтений с учетом возможности множественного выбора; во-вторых, определить степень лояльности к конкретным брендам; в-третьих, проанализировать корреляцию между факторами при покупке пастеризованного питьевого коровьего молока (2,5 % жирности) конкретной торговой марки (ТМ). Анализ проводился для товаров в мягкой упаковке, выбор которой обусловлен низкой ценой и широкой представленностью в ассортименте ключевых производителей.

В результате получены данные, позволяющие ранжировать бренды в зависимости от степени их привлекательности при выборе для потребителя (рис. 3).

Результаты исследования позволяют выделить две значимые группы при выборе молока. Первая доминирующая группа – ТМ «Крымский молочник» (48,3 %) и ТМ «Джанкойское молоко» (43,3 %) – демонстри-

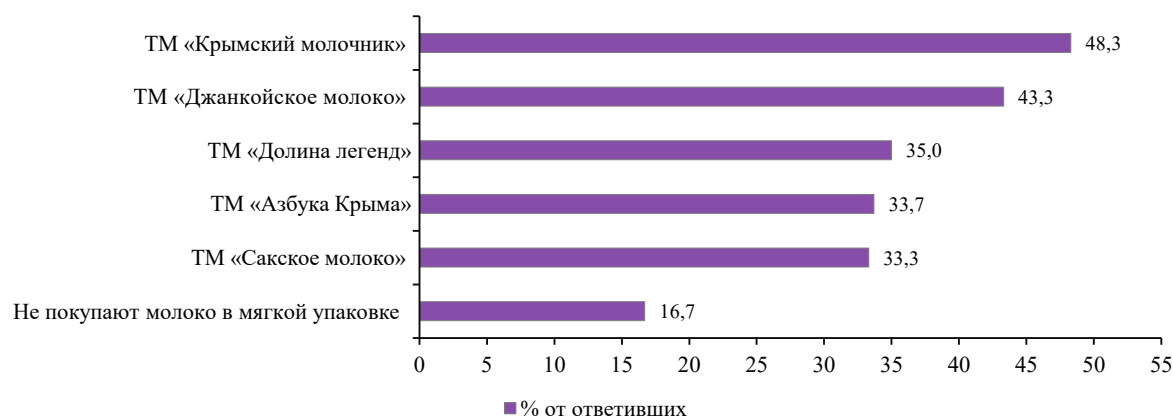


Рисунок 3. Потребительские предпочтения относительно выбора брендов питьевого пастеризованного молока 2,5 % жирности региональных производителей ($n = 300$)

Figure 3. Consumer preferences regarding regional pasteurized milk brands with 2.5% fat ($n = 300$)

рует существенное преобладание в потребительских предпочтениях. Вторую, альтернативную группу, сформировали ТМ «Долина легенд» (35,0 %), ТМ «Азбука Крыма» (33,7 %) и ТМ «Сакское молоко» (33,3 %), показавшие более низкий уровень потребительского выбора. Наблюдаемый разрыв 5–15 % между группами свидетельствует о качественных различиях в восприятии данных брендов, что обусловлено комплексом факторов: дифференциацией ценового позиционирования, вариативностью маркетинговых коммуникаций, особенностями финансово-хозяйственной и товарной политики, а также региональной спецификой восприятия брендов.

Проведенный анализ гендерной дифференциации потребительских предпочтений в отношении молока региональных производителей на данном этапе позволил выявить значимые диспропорции в структуре потребления. Данные демонстрируют выраженную брендовую сегментацию по гендерному признаку: молоко ТМ «Крымский молочник» более популярно среди мужской аудитории (24,55 % против 21,45 % у женщин), тогда как молоко ТМ «Джанкойское молоко» пользуется относительно равномерным спросом (21,78 % женщин и 19,39 % мужчин). Наиболее заметная гендерная поляризация наблюдается при выборе молока ТМ «Сакское молоко» – 17,53 % у мужчин против 13,86 % у женщин и ТМ «Азбука Крыма» – 18,15 % у женщин против 14,24 % у мужчин. Среди респондентов, избегающих покупки молока в мягкой упаковке, сохраняется гендерная асимметрия – женщины чаще отказываются от такой упаковки (8,91 % против 6,97 % у мужчин). Полученные результаты позволяют предположить существование сложного комплекса детерминантов, включающего как психофизиологические особенности сенсорного восприятия (различия в гедонистической оценке органолептических характеристик), так и социально-культурные факторы

(гендерные стереотипы пищевого поведения, эффективность таргетированных маркетинговых коммуникаций).

На следующем этапе исследования проводили углубленный факторный анализ для выявления закономерностей при выборе потребителями молока для верификации гипотез о природе наблюдаемых гендерных диспропорций в потребительских предпочтениях. Ранжирование факторов осуществляли на основе средних значений оценок важности каждого критерия по 5-балльной шкале (где 1 – минимальная, 5 – максимальная значимость). Полученные данные представлены в таблице 3.

Полученные данные демонстрируют: потребительские предпочтения формируются под влиянием множества факторов, среди которых для мужчин ключевую роль играют качество (4,06 балла), герметичность (4,05 балла), вкус (3,98 балла), для женщин – вкус (4,17 балла), качество (4,14 балла) и герметичность (4,13 балла). При этом такой фактор, как широкий ассортимент, является наименее значимым для респондентов – как мужчин, так и женщин (3,31 и 3,33 балла соответственно). Следует отметить, что значимость факторов – состав, цена, соответствие ГОСТ, упаковка, жирность, торговая марка, срок хранения, местный производитель – варьируется в зависимости от гендерной принадлежности покупателя. Полученные результаты частично подтверждают гипотезу H_2 : базовые детерминанты потребительского выбора (качество, герметичность упаковки и вкусовые характеристики) являются общими для обеих гендерных групп, однако демонстрируют статистически значимые различия в степени их влияния.

Результаты корреляционного анализа (коэффициент Пирсона, $p < 0,01$) выявили статистически значимые взаимосвязи между всеми исследуемыми параметрами потребительских предпочтений в отношении молочной продукции. У мужчин наибольшая корреляционная

Таблица 3. Ранжирование факторов потребительского выбора молочной продукции ($n = 300$)Table 3. Priority factors in consumer selection of dairy products ($n = 300$)

Фактор	Мужчины			Фактор	Женщины		
	Средний балл	Стандартное отклонение	Ранг		Средний балл	Стандартное отклонение	Ранг
Качество	4,06	0,95	1	Вкус	4,17	1,12	1
Герметичность	4,05	1,08	2	Качество	4,14	1,15	2
Вкус	3,98	0,96	3	Герметичность	4,13	1,18	3
Торговая марка	3,89	1,31	4	Срок хранения	3,89	1,15	4
Состав	3,87	0,96	5	Соответствие ГОСТ	3,84	1,27	5
Цена	3,79	1,24	6	Состав	3,82	1,21	6
Соответствие ГОСТ	3,77	1,09	7	Цена	3,73	1,24	7
Срок хранения	3,61	1,13	8	Местный производитель	3,68	1,01	8
Жирность	3,56	1,13	9	Жирность	3,63	1,08	9
Упаковка	3,54	1,21	10	Доступность в магазинах	3,54	1,19	10
Местный производитель	3,51	1,13	11	Упаковка	3,50	1,30	11
Доступность в магазинах	3,49	1,11	12	Торговая марка	3,45	1,18	12
Широкий ассортимент	3,31	1,29	13	Широкий ассортимент	3,33	1,22	13

связь ($r > 0,7$) наблюдается между потребительской оценкой и факторами: цена, качество, торговая марка, состав, широкий ассортимент, доступность в магазинах, герметичность, жирность. Остальные факторы демонстрируют среднюю корреляционную связь ($0,7 < r < 0,9$) с потребительской оценкой молока. У женщин наибольшая корреляционная связь ($r > 0,7$) выявлена между потребительской оценкой и факторами: качество, вкус, торговая марка, состав, широкий ассортимент, доступность в магазинах, герметичность. Остальные факторы также характеризуются средней корреляционной связью ($0,7 < r < 0,9$) с потребительской оценкой молока. Полученные результаты подтверждают комплексный характер формирования лояльности при выборе молока.

Фактор вкуса, тесно связанный с факторами качества ($r = 0,876$), состава ($r = 0,791$) и герметичности ($r = 0,727$), подтверждает свою ключевую роль в формировании потребительских предпочтений. Эти данные согласуются с результатами словацкого исследования [23], в котором вкус идентифицирован как основной мотивирующий фактор (19,80 % выбора), ключевой барьер потребления при несоответствии ожиданиям и интегральный показатель, объединяющий представления о качестве и полезности продукта.

При этом качество связано с объективными характеристиками: составом ($r = 0,796$), сроком хранения ($r = 0,705$), герметичностью упаковки ($r = 0,748$), соответствием ГОСТ ($r = 0,656$) и жирностью ($r = 0,637$). Это свидетельствует о том, что потребители воспринимают вкус не изолированно, а в комплексе с параметрами, обеспечивающими безопасность и стандартизацию продукции.

Фактор цены умеренно коррелирует со вкусом ($r = 0,608$), сроком хранения ($r = 0,611$), герметичностью ($r = 0,600$), что отражает тенденцию восприятия стоимости как косвенного показателя органолептических свойств и надежности продукта. При этом решающее влияние на потребительскую оценку оказывают объективные параметры – соответствие стандартам и целостность упаковки.

Фактор торговой марки тесно связан с упаковкой ($r = 0,723$) и умеренно – с широким ассортиментом ($r = 0,618$), что подчеркивает важность визуальной идентификации и доступности продукции в формировании лояльности к локальным производителям. Таким образом, этноцентрические предпочтения опосредованы не только культурными факторами, но и практическими аспектами – узнаваемостью бренда и логистической доступностью.

Срок хранения значимо коррелирует с качеством ($r = 0,705$), составом ($r = 0,715$), соответствием ГОСТ ($r = 0,703$) и герметичностью ($r = 0,739$), что подтверждает его роль как одного из ключевых индикаторов безопасности и свежести продукта.

Наибольшее влияние на совокупную потребительскую оценку оказали факторы: вкус ($r = 0,821$), качество ($r = 0,803$), состав ($r = 0,829$), срок хранения ($r = 0,818$), соответствие ГОСТ ($r = 0,816$) и герметичность упаковки ($r = 0,848$), что указывает на приоритетность безопасности, стандартизации и органолептических свойств при выборе продукции.

Результаты исследования подтверждают, что доверие потребителей к молочной продукции формируется под влиянием безопасности и сенсорных характеристик.

При этом цена играет вторичную роль, выступая скорее как индикатор ожидаемого качества, чем как самостоятельный детерминант выбора, что находит подтверждение в работе зарубежных исследователей [23]. Следует отметить, что цена, не являясь первостепенным фактором выбора между конкурирующими брендами, сохраняет макроэкономическую значимость как регулятор потребления. Поскольку молоко и молочная продукция входят в потребительскую корзину, их ценовая динамика напрямую влияет на объемы потребления: устойчивый рост цен провоцирует снижение спроса, что находит подтверждение в наблюдаемой отрицательной динамике потребления молока и молочных продуктов в реальном выражении (табл. 1). Таким образом, если на микроуровне (в ситуации выбора между конкретными торговыми марками) цена выполняет сигнальную функцию, указывая на предполагаемое качество, то на макроуровне она выступает классическим детерминантом доступности, ограничивающим покупательскую способность и модифицирующим структуру потребления домохозяйств.

В таблице 4 представлены средние потребительские цены на отдельные виды молочной продукции (на конец года, рублей за кг, в масштабе цен соответствующих лет) за период 2016–2023 гг.

Анализ динамики цен на ключевые виды молочной продукции в период 2016–2023 гг. демонстрирует устойчивую тенденцию к росту по всем категориям. Наиболее значительное повышение цен наблюдается в категории сливочного масла, где цена увеличилась на 85,5 % (с 502,26 руб./кг в 2016 г. до 931,77 руб./кг в 2023 г.). Цены на пастеризованное молоко за исследуемый период также показали существенный рост на 49,1 % (с 61,98 до 92,46 руб./л). Цены на твердые, полутвердые и мягкие сыры росли более умеренно, но стабильно и увеличились за 7 лет на 34,9 % (с 609,17 до 821,92 руб./кг), при этом наиболее резкий скачок произошел в 2022 г., что связано с макроэкономической волатильностью и изменениями на рынке.

Проведенный корреляционный анализ между ценами и объемом потребления молочной продукции

в Крыму позволил выявить статистически значимые и структурно обоснованные взаимосвязи. Обнаружена сильная отрицательная корреляция между ценами на все категории молочных продуктов (масло: $r = -0,975$; молоко: $r = -0,990$; сыр: $r = -0,993$, значимость на уровне $p < 0,01$) и общим объемом их потребления: цена является ключевым фактором спроса на молочную продукцию. Рост цен приводит к статистически значимому сокращению потребления. Наибольшее влияние на сокращение потребления оказывает цена на сыр ($r = -0,993$), что связано с его более высокой эластичностью спроса по цене по сравнению с молоком и маслом: сыр часто воспринимается как товар не первой необходимости. Также наблюдается синхронность ценовой динамики, выраженная в сильной положительной корреляции между ценами на разные категории продуктов ($r = 0,962–0,987$), что указывает на наличие общих макроэкономических и отраслевых факторов, связанных с ростом себестоимости производства, логистических издержек, цен на энергоресурсы, равномерно воздействующих на весь рынок молочной продукции.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что молочная продукция, несмотря на свою важность в потребительской корзине, является товаром с эластичным спросом в долгосрочной перспективе. В условиях роста доходов, не успевающего за инфляцией, потребители вынуждены сокращать объемы покупок, замещать дорогие товары более дешевыми аналогами или перераспределять бюджет в пользу других продуктовых категорий. Общий тренд увеличения цены на молоко и молочные продукты подтверждает усиление нагрузки на потребительский бюджет, что влияет на сокращение реальных объемов потребления из-за снижения покупательной способности.

Лояльное отношение к местным брендам обусловлено не только этнокультурными предпочтениями, но и узнаваемостью торговой марки и доступностью ассортимента. Проведенный анализ позволяет сделать вывод о существовании универсального ядра значимых характеристик (качество – герметичность – вкус)

Таблица 4. Средние потребительские цены на отдельные виды молочной продукции в Республике Крым за период 2016–2023 гг. (на конец года, в масштабе цен соответствующих лет)*

Table 4. Average year-end consumer prices for dairy products in Crimea: current prices in 2016–2023*

Вид молочной продукции	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Масло сливочное, руб./кг	502,26	530,49	556,60	662,87	726,96	833,02	905,54	931,77
Молоко питьевое цельное пастеризованное 2,5–3,2 % жирности, руб./л	61,98	58,70	64,39	68,14	74,58	78,52	86,67	92,46
Сыры твердые, полутвердые и мягкие, руб./кг	609,17	538,32	549,75	593,83	638,65	664,42	770,32	821,92

Примечание: * – таблица составлена авторами на основании официальных статистических данных Управления Федеральной службы государственной статистики по Республике Крым и г. Севастополю.

Note: * – table 4 features official statistical data from the Office of the Federal State Statistics Service for the Republic of Crimea and Sevastopol.

Таблица 5. Результаты факторного анализа повернутой матрицы компонентов с вращением Варимакс* (VER) с нормализацией Кайзера

Table 5. Factor structure of milk consumption drivers: Varimax rotated component matrix with Kaiser Normalization

Фактор	Общее		Мужчины		Женщины	
	Компонент 1	Компонент 2	Компонент 1	Компонент 2	Компонент 1	Компонент 2
Цена	0,547	0,400	0,599	0,379	0,662	0,208
Качество	0,889	0,160	0,192	0,901	0,875	0,194
Вкус	0,871	0,107	0,120	0,908	0,854	0,147
Торговая марка	0,169	0,859	0,843	0,191	0,150	0,862
Состав	0,802	0,264	0,302	0,763	0,820	0,285
Местный производитель	0,241	0,768	0,748	0,234	0,227	0,786
Широкий ассортимент	0,269	0,724	0,755	0,216	0,262	0,716
Доступность в магазинах	0,462	0,644	0,714	0,319	0,519	0,616
Упаковка	0,236	0,803	0,834	0,137	0,267	0,781
Жирность	0,561	0,492	0,584	0,490	0,572	0,460
Срок хранения	0,700	0,364	0,542	0,518	0,785	0,270
Соответствие ГОСТ	0,658	0,374	0,489	0,505	0,701	0,360
Герметичность упаковки	0,736	0,379	0,483	0,615	0,801	0,325

Примечание: * – вращение сошлось за 3 итерации.

Note: * – rotation converged in three iterations.

с гендерно-специфической вариативностью второстепенных параметров. Это подтверждает гипотезу H_2 в части идентичности ключевых факторов выбора, но требует ее уточнения в аспекте градиентных различий в степени их влияния.

Факторный анализ Варимакс позволил выявить ключевые факторы выбора молока на разных этапах принятия решения. Результаты факторного анализа в общем по всем респондентам, а также для мужчин и женщин представлены в таблице 5.

Результаты факторного анализа методом главных компонент с вращением Варимакс с нормализацией Кайзера позволили выделить значимые различия в приоритетах мужчин и женщин при выборе молочной продукции. Выявленные факторы сгруппированы в два укрупненных уровня, которые формируют поэтапную модель потребительских предпочтений при выборе молока:

1 группа. Качественно-оганолептические характеристики, включающие качество (0,889), вкус (0,871), состав (0,802), срок хранения (0,700), герметичность упаковки (0,736) и соответствие ГОСТ (0,658), отражают значимость объективных параметров продукта, связанных с его потребительскими свойствами и безопасностью. Потребители на данном этапе сначала выбирают варианты по базовым параметрам (срок годности, состав, соответствие ГОСТ), чтобы минимизировать риски выбора некачественного молока.

2 группа. Имиджево-ассортиментные характеристики, объединяющие торговую марку (0,859), местного производителя (0,768), ассортимент (0,724), доступность в магазинах (0,644) и упаковку (0,803), связаны с восприятием бренда, локальностью производства и удобством приобретения на этапе окончательного

выбора молока посредством изучения второстепенных, но субъективно значимых атрибутов.

Оценивая последовательность поэтапного принятия решения мужчинами и женщинами, можно отметить значимые различия в потребительском поведении данных групп. Мужчины демонстрируют более выраженную ориентацию на имиджевые аспекты: торговая марка (0,843), упаковка (0,834) и местный производитель (0,748) указывают на значимость брендовой идентичности и визуальных характеристик при выборе продукта, что свидетельствует о более прагматичном подходе к отдельным функциональным параметрам в процессе принятия решения о покупке. Женщины первоначально при выборе молока ориентируются на качественные и функциональные аспекты, поэтому наиболее значимыми факторами для них являются качество (0,875), вкус (0,854), состав (0,820) и срок хранения (0,785), что указывает на значимость безопасности, натуральности и долговечности продукта. На втором этапе при выборе женщинами также значимы факторы: торговая марка (0,862) и упаковка (0,781), но в меньшей степени, чем у мужчин, что подтверждает более сбалансированный подход к выбору. Полученные результаты обосновывают гипотезу H_3 о существовании статистических различий в гендерно-специфичных паттернах потребительского поведения при выборе молока.

Подобная двухэтапная последовательность действий при выборе молока согласуется с психологической моделью потребительского поведения на основе поведенческой теории [27]; выявленные закономерности свидетельствуют о гендерной дифференциации в процессе выбора и принятия решения о покупке. При выборе молока мужчины чаще руководствуются

внешними атрибутами (бренд, упаковка), что связано с меньшей вовлеченностью в детальный анализ качественных характеристик и состава товара, поэтому мужчины упрощают процесс принятия решения, переходя сразу к этапу покупки, т. е. мужчины склонны к рациональной оценке при выборе молока.

Женщины чаще совершают повседневные покупки, тем самым формируя более детализированные критерии оценки для обеспечения безопасного выбора товаров продуктов питания, что указывает на их высокую вовлеченность в процесс выбора. Женщины демонстрируют высокую чувствительность к параметрам, связанным с безопасностью (состав, вкус, качество, местное производство) и стандартизацией (ГОСТ), поскольку учитывают долгосрочные последствия выбора. Кроме того, женщины более активные покупатели по сравнению с мужчинами, совершают покупки для всех членов семьи [28].

Множественный регрессионный анализ позволил выявить значимость факторов выбора молока в мягкой упаковке. На первом этапе выбора доминирующую роль играют параметры безопасности и базового качества, что подтверждается высокой объясняющей способностью модели качественно-органолептических характеристик ($F(6,297) = 247,981$; $p < 0,001$; $R^2 = 0,834$), т. е. 83,4 % вариативности потребительских оценок обусловлено включенными в модель предикторами. При этом наиболее значимыми факторами выступают герметичность упаковки ($\beta = 0,283$), срок хранения ($\beta = 0,224$), соответствие ГОСТ ($\beta = 0,200$), состав ($\beta = 0,187$), качество продукции ($\beta = 0,126$), вкусовые характеристики ($\beta = 0,076$), что отражает стремление потребителей минимизировать риски потребления небезопасной продукции.

На втором этапе окончательного выбора ключевое значение приобретают имиджево-ассортиментные аспекты, о чем свидетельствует значимость модели маркетинговых характеристик ($F(5,298) = 229,323$; $p < 0,001$, $R^2 = 0,794$), т. е. 79,4 % вариативности потребительских оценок объясняется включенными в модель предикторами. В этой группе наибольшее влияние оказывают доступность продукции ($\beta = 0,369$), характеристики упаковки ($\beta = 0,211$) и фактор местного производства ($\beta = 0,188$). Примечательно, что параметры ассортимента ($\beta = 0,156$) и торговой марки ($\beta = 0,164$) демонстрируют несколько меньшую, но статистически значимую роль.

Полученные данные регрессионного анализа подтверждают существование выявленной двухуровневой модели принятия потребительских решений при выборе молочной продукции в мягкой упаковке: от базовых критериев безопасности к дополнительным маркетинговым характеристикам. Высокая объясняющая способность обеих моделей (83,4 и 79,4 % соответственно) свидетельствует о необходимости комплексного подхода к управлению потребительскими предпочтениями, учитывающего как объективные качественные параметры продукции, так и субъективные маркетинговые аспекты ее позиционирования.

Для проверки гипотезы H_4 о влиянии семьи и привычек на покупку товаров локального производства, а также молочных продуктов исследовались три суждения, предложенные в анкете. Компоненты суждений оценивались по 7-балльной шкале Лайкерта (1 – полностью не согласен; 7 – полностью согласен). Надежность для всех суждений, определяющих влияние семьи на потребительский выбор, оценивалась на основе коэффициента α -Кронбаха, который составил $0,846 > 0,700$, что свидетельствует о высокой внутренней согласованности всех компонентов, вошедших в анкетный опрос (табл. 6).

Результаты анкетного опроса, направленного на выявление ключевых детерминантов потребительского выбора крымского молока, демонстрируют устойчивую взаимосвязь между традиционными поведенческими паттернами и лояльностью к региональному продукту. Надежность измерительных шкал подтверждается высокими значениями коэффициента α -Кронбаха ($\alpha = 0,745–0,839$), что свидетельствует о внутренней согласованности данных. Наибольшую значимость в структуре потребительских мотиваций имеет фактор знания о продукте (средний балл – 5,02): это отражает тенденцию к предпочтению узнаваемых товаров с учетом положительного предыдущего опыта покупки. Факторы привычки (4,77 балла) и влияния семейных традиций (4,60 балла) также оказывают существенное воздействие на принятие решения о покупке, однако в меньшей степени, что частично согласуется с результатами проведенного ранее исследования, в котором фактор покупки молока другим членом семьи являлся вторым по значимости в процессе потребительского выбора (14,16 %) [23]. Семья выступает ключевым агентом социализации, формируя привычки и предпо-

Таблица 6. Влияние привычек, узнаваемости и семейных традиций при выборе молока локальных производителей

Table 6. Effect of habits, brand visibility, and family traditions on consumer preferences for local dairy products

Суждение	α -Кронбаха	Ответы на 5–7 баллов (показатель согласия),%	Среднее
Я покупаю крымское молоко по привычке	0,773	62,2	4,77
Я покупаю крымское молоко, т. к. оно мне больше знакомо	0,745	65,1	5,02
Я покупаю крымское молоко вслед за старшими членами семьи	0,839	57,0	4,60

чения, однако культурные и социальные факторы, мода и цифровые медиа могут ослаблять ее роль, снижая значимость семейных паттернов. Согласно исследованию, молодежь все чаще выбирает готовые блюда, полуфабрикаты и альтернативные варианты (растительное молоко, безлактозные йогурты, десертные линейки), что связано с экономией времени и стремлением к индивидуализации питания; классические молочные продукты (кефир, молоко) ассоциируются с устаревшими привычками старшего поколения [29]. На основании проведенного анализа можно констатировать, что гипотеза H_4 о влиянии семейных традиций на выбор товаров находит частичное подтверждение в рамках исследования потребительских предпочтений относительно крымской молочной продукции. Семейные традиции потребления являются значимыми, но не главными мотивационными факторами, вследствие чего для продвижения локальных брендов требуется учет поколенческих различий, экономических условий и культурного контекста.

На заключительном этапе кластерного анализа на основе рассмотренных факторов использован методологически обоснованный подход к сегментации рынка региональных производителей. Комбинация этих методов позволяет перейти от выявления латентных структур потребительских предпочтений к практической группировке объектов исследования, которыми в данном случае являются региональные молочные бренды Крыма [30, 31]. Факторный анализ позволяет выявить ключевые параметры, определяющие восприятие брендов потребителями, но только последующая кластеризация дает возможность объективно сегментировать производителей на однородные группы по выделенным факторам, выявить конкурентные

ниши, определить эталонные бренды в каждом кластере для разработки стратегических альтернатив позиционирования. В контексте поддержки региональных производителей такой анализ приобретает особую значимость, поскольку эффективное продвижение местных брендов требует дифференцированного подхода к различным группам производителей, выявления уникальных конкурентных преимуществ каждого кластера и разработки адресных мер поддержки с учетом специфики кластеров.

В таблице 7 представлены усредненные значения факторных нагрузок по ключевым выделенным факторам для каждой марки.

Усредненные данные факторного анализа демонстрируют значительную однородность восприятия при наличии отдельных дифференцирующих характеристик: все исследуемые торговые марки получили высокие оценки (3,900–4,038 балла) по анализируемым параметрам, что свидетельствует о положительном восприятии крымской молочной продукции потребителями.

Наибольшие межбрендовые различия наблюдаются по фактору «Доступность в магазинах», где ТМ «Джанкойское молоко» и ТМ «Крымский молочник» получили максимальные оценки (4,004 балла), тогда как ТМ «Долина легенд» показала минимальный результат (3,906 балла). Анализ фактора «Местный производитель» свидетельствует о дифференцированном восприятии региональной принадлежности анализируемых брендов потребительской аудиторией. Максимальные значения данного параметра зафиксированы у ТМ «Сакское молоко» (4,029 балла) и ТМ «Джанкойское молоко» (4,008 балла), тогда как показатели ТМ «Азбука Крыма» минимальны (3,941 балла).

Таблица 7. Усредненные данные факторного анализа при выборе молока региональных производителей

Table 7. Factor analysis of consumer preferences for local dairy products, mean values

Фактор	ТМ «Крымский молочник»	ТМ «Джанкойское молоко»	ТМ «Долина легенд»	ТМ «Азбука Крыма»	ТМ «Сакское молоко»
Цена	3,920	3,943	3,985	4,017	3,960
Качество	3,925	3,929	3,977	3,960	3,900
Вкус	3,971	3,996	3,952	4,004	4,002
Торговая марка	3,939	3,956	3,912	3,962	4,000
Состав	3,967	3,956	3,985	3,941	4,027
Местный производитель	3,975	4,008	3,979	3,941	4,029
Широкий ассортимент	4,023	3,994	3,977	3,967	3,958
Доступность в магазинах	4,004	4,004	3,906	3,992	3,973
Упаковка	4,011	3,946	4,036	3,916	3,964
Жирность	3,994	4,010	4,008	3,998	4,021
Срок хранения	3,971	4,002	3,994	3,944	3,950
Соответствие ГОСТ	3,920	3,946	3,933	3,950	3,966
Герметичность упаковки	3,969	3,960	4,031	4,038	3,977

Особого внимания заслуживает фактор «Упаковка», который демонстрирует наибольший разброс оценок: от 3,916 (ТМ «Азбука Крыма») до 4,036 (ТМ «Долина легенд»). При этом параметры «Жирность» и «Соответствие ГОСТ» показывают минимальную вариативность между брендами (разница менее 0,05 балла), что указывает на их стандартизованность в рамках регионального рынка.

Анализ средних значений по факторам выявил, что наивысшие оценки получили: ТМ «Сакское молоко» – по 4 параметрам, ТМ «Азбука Крыма» и ТМ «Джанкойское молоко» – по 3 параметрам, ТМ «Долина легенд» и ТМ «Крымский молочник» – по 2 параметрам.

Процесс кластеризации региональных брендов осуществлялся в четыре последовательных этапа (табл. 8), отражая постепенное формирование кластерной структуры от наиболее схожих пар брендов к полной агломерации всех объектов исследования.

Полученные результаты свидетельствуют: наибольшую степень сходства демонстрируют молочные

бренды ТМ «Джанкойское молоко» (2) и ТМ «Сакское молоко» (5), что подтверждается минимальным квадратом евклидова расстояния между ними (0,014) [32]. Это позволяет объединить их в единый кластер массовых брендов, характеризующихся схожими параметрами восприятия потребителями. Бренд ТМ «Крымский молочник» занимает промежуточное положение, демонстрируя относительную близость к кластеру массовых брендов (расстояние 0,022 до ТМ «Джанкойского молока»). ТМ «Долина легенд» (3) и ТМ «Азбука Крыма» (4), имея выраженную дифференциацию по факторам цены и упаковки, образуют периферийный кластер нишевых молочных брендов с максимальным евклидовым расстоянием 0,027 и 0,031 до ТМ «Джанкойское молоко».

Результаты агломеративного кластерного анализа пяти крымских молочных брендов с использованием метода средних межгрупповых связей на основе матрицы квадратов евклидовых расстояний представлены на рисунке 4.

Таблица 8. Результаты иерархической кластеризации региональных молочных брендов (метод межгрупповых связей)

Table 8. Hierarchical clustering of local dairy brands: Intergroup relations

Этап	Объединенный кластер		Коэффициенты	Этап первого появления кластера		Следующий этап
	Кластер 1	Кластер 2		Кластер 1	Кластер 2	
1	2	5	0,014	0	0	2
2	1	2	0,022	0	1	3
3	1	3	0,027	2	0	4
4	1	4	0,031	3	0	0

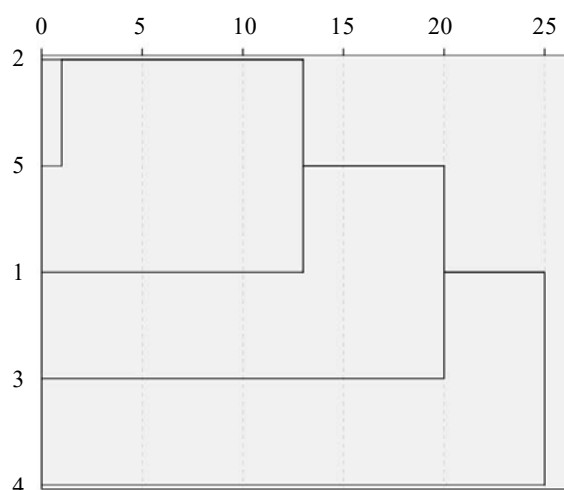


Рисунок 4. Дендрограмма иерархической кластеризации молочных брендов Крыма (метод средних межгрупповых связей). По оси ординат отложены значения коэффициентов агломерации, по оси абсцисс – идентификаторы брендов: 1 – ТМ «Крымский молочник», 2 – ТМ «Джанкойское молоко», 3 – ТМ «Долина легенд», 4 – ТМ «Азбука Крыма», 5 – ТМ «Сакское молоко». Линиями обозначены оптимальные уровни разбиения на кластеры

Figure 4. Hierarchical clustering of Crimean dairy brands (intergroup relations, mean values): y – agglomeration coefficients; x – brand identifiers; 1 – Krymskiy Molochnik, 2 – Dzhankoysskoye Moloko, 3 – Dolina Legend, 4 – Azbyka Kryma, and 5 – Sakskeye Moloko; the lines mark optimal clusters

Выявленные кластеры позволяют предложить дифференцированные маркетинговые стратегии продвижения крымских молочных брендов, учитывающие их реальное положение в восприятии потребителей.

Для кластера массовых брендов (FMCG-рынок), который включает ТМ «Джанкойское молоко» (2) и ТМ «Сакское молоко» (5), рекомендуется проводить оптимизацию ценового позиционирования через развитие кооперационных связей между производителями, расширение каналов дистрибуции с акцентом на локальные торговые сети и усиление региональной идентичности продукции посредством географического брендинга.

Для среднего кластера брендов (ТМ «Крымский молочник» (1)) оптимальной является стратегия позиционирования «золотой середины» с акцентом на соотношение цены и качества. Для реализации этого подхода необходимо развивать узнаваемость бренда через региональные средства массовой информации, делая упор на традициях крымского молочного животноводства. Участие в сельскохозяйственных выставках позволит установить прямые контакты с потенциальными покупателями и партнерами. Особое внимание следует уделить программам лояльности для постоянных потребителей.

Для нишевого кластера (ТМ «Долина легенд» (3) и ТМ «Азбука Крыма» (4)) предлагается разработка гибридной маркетинговой стратегии, сочетающей элементы массового и премиального позиционирования, которые базируются на подчеркивании уникальных характеристик продукции. Продвижение через специализированные торговые точки, использование цифровых инновационных технологий (умных NFC-меток на упаковке для автоматического пополнения программ лояльности), участие в гастрономических фестивалях создадут образ элитного продукта. Важным элементом должно стать продвижение истории бренда, подчеркивающей его связь с крымскими традициями.

Реализация предложенных стратегий позволит создать сбалансированную систему продвижения крымских молочных брендов, где каждый кластер займет свою рыночную нишу, что приведет к росту добавленной стоимости продукции за счет дифференциации, развитию смежных отраслей (переработки, логистики, туризма), повышению уровня жизни сельского населения, формированию устойчивой региональной идентичности.

Выводы

Результаты исследования указывают на необходимость комплексного подхода к формированию лояльности и продвижению молочной продукции в качестве регионального бренда, основанного на понимании структуры значимых факторов при выборе молока. Эмпирические данные проведенного исследования свидетельствуют о том, что потребитель-

ский выбор представляет собой сложный двухуровневый процесс. На первом уровне ($R^2 = 0,834$) доминируют критерии безопасности и качества, на втором ($R^2 = 0,794$) – социокультурные факторы и локальность производства. Доказано сохранение влияния семейных традиций (57 % респондентов, $\alpha = 0,839$), хотя их значимость снижается под воздействием цифровизации и новых потребительских трендов.

Региональные стратегии развития молочного производства должны быть одновременно направлены на продолжение финансовой поддержки местных производителей, внедрение ресурсосберегающих технологий, повышение производительности и снижение себестоимости продукции, что позволит обеспечить ценовую доступность социально значимых молочных продуктов при параллельном расширении ассортимента, формировании устойчивых потребительских привычек и укреплении региональной идентичности.

Продвижение брендов молочной продукции ориентировано на некоторые ключевые направления.

1. Адаптация к местным рынкам требует понимания культурных особенностей и потребительских предпочтений каждого конкретного региона, что особенно важно для молочной продукции, традиционно имеющей сильную территориальную привязку. Компании должны осуществлять комплексную локализацию как самих продуктов, так и маркетинговых коммуникаций, учитывая местные вкусовые предпочтения, традиции потребления и культурные особенности восприятия. Такой подход предполагает тщательный анализ региональной специфики – от предпочтений в жирности и консистенции молочных продуктов до особенностей упаковки и каналов сбыта, характерных для конкретной территории. Адаптация ассортимента молочной продукции может включать модификацию рецептур под местные вкусы, введение специальных линеек продуктов, учитывающих региональные традиции потребления; разработку персонализированных рекламных кампаний, использующих локальные культурные коды и символы. Особое значение имеет использование местных каналов коммуникации и сотрудничество с региональными представителями, что позволяет установить эмоциональный контакт с целевой аудиторией и повысить доверие к бренду. Реализация такой стратегии адаптации для молочных брендов позволит не только увеличить эффективность маркетинговых инвестиций, но и создать устойчивые конкурентные преимущества, основанные на понимании специфики региона и формировании прочных взаимоотношений с местными потребителями, что особенно важно для категории продуктов, традиционно воспринимаемых как местные. Кроме того, учитывая туристскую специализацию Республики Крым, целесообразно интегрировать местную молочную продукцию в гастрономические туры, сельский зеленый туризм и курортные меню, подчеркивая ее экологичность и традиционность.

2. Для изменения культуры потребления молочной продукции и стимулирования спроса необходимо формирование устойчивых ассоциативных связей между молочными продуктами и ценностями здоровья, семейных традиций и экологической ответственности, что требует многоуровневого воздействия на целевую аудиторию. В условиях растущего потребительского спроса на здоровое питание региональные молочные бренды могут использовать конкурентное преимущество через акцентирование на функциональных и нутрицевтических свойствах продукции. Научно обоснованная стратегия позиционирования должна базироваться на трех ключевых аспектах: доказанной натуральности сырьевой базы (подтвержденной экологической сертификацией местных производств, фермерских хозяйств), сохранении традиционных технологий обработки молока (минимизирующих потерю полезных веществ) и разработке специализированных линеек (низколактозных, пробиотических и витаминизированных продуктов). Однако современные потребительские тренды, в частности низкая распространенность культуры регулярного потребления молочной продукции среди молодежи, а также ограничения, связанные с лактозной непереносимостью и веганскими предпочтениями, требуют особого подхода в маркетинговой стратегии. Эта стратегия должна включать образовательный компонент – разъяснение преимуществ современных молочных продуктов (легкоусвояемые формы, обогащенный состав) и их интеграцию в популярные среди молодежи форматы потребления (смузи, протеиновые коктейли, полезные перекусы). Следует активизировать просветительские программы, интегрированные в образовательные учреждения, где через интерактивные форматы (мастер-классы по приготовлению творожных десертов, научные эксперименты, демонстрирующие содержание кальция в продуктах) можно сформировать позитивное отношение к потреблению молока и молочных продуктов у детей. Особое внимание следует уделить цифровым каналам коммуникации и сотрудничеству с молодежными инфлюенсерами в сфере ЗОЖ, что позволит преодолеть существующие стереотипы и сформировать новую культуру потребления молочной продукции среди молодежи. Для взрослой аудитории эффективным инструментом может стать сотрудничество с медицинскими учреждениями, где в рамках профилактических осмотров будет распространяться персонализированная информация о роли молочных продуктов в предотвращении остеопороза и поддержании микробиома кишечника, подкрепленная данными доказательной медицины.

3. Ключевым элементом эффективной маркетинговой стратегии региональных молочных брендов Крыма является внедрение стандартизированной системы маркировки, соответствующей как российским техническим регламентам (ТР ТС 022/2011), так и особым требованиям к указанию географического происхождения продукции. Обязательное включение

на потребительскую упаковку четких указаний «Сделано в Крыму» или соответствующих символов (географических обозначений, элементов крымской геральдики), согласно теоретическим положениям [33], будет способствовать повышению потребительского доверия через активизацию механизмов территориальной идентификации, подчеркивая местное происхождение и качество продукции. Для снижения риска приобретения некачественной молочной продукции необходима стандартизация текстового сопровождения, включающая унифицированные формулировки о традиционных технологиях производства, обоснование преимуществ крымского молока, экологической чистоте сырья и функциональных свойствах продукции, разработанные на основе ГОСТ Р 51074-2003 с учетом последних изменений в области пищевого законодательства.

Внедрение комплексного подхода, сочетающего образование, социальное влияние и технологические решения, обеспечит изменение текущей негативной тенденции, превратив молочные продукты из категории вынужденного потребления в осознанный выбор, связанный с качеством жизни, и создаст синергетический эффект, усиливая как восприятие молочной продукции местных производителей, так и конкурентное преимущество перед другими брендами, что обеспечит устойчивый спрос на молочную продукцию в регионе.

Критерии авторства

Н. Н. Калькова – разработка концепции и дизайна исследования, сбор и интерпретация данных и материалов, подготовка и редактирование текста статьи. О. Б. Ярош – сбор и анализ литературных данных, обработка иллюстраций, подготовка статьи к публикации. С. Е. Бабак – анализ данных. Все соавторы согласовали и утвердили окончательный вариант текста статьи и несут равную ответственность за его целостность, достоверность материалов и плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution

N.N. Kalkova developed the research concept and design, collected and interpreted the data and materials, wrote and proofread the manuscript. O.B. Yarosh wrote the review, provided the visual material, and proofread the manuscript. S.E. Babak performed the data analysis. All the co-authors approved of the final version and are equally responsible for its integrity, reliability, and any potential plagiarism.

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. Bojovic M, McGregor A. To milk, or not to milk? Exploring just and sustainable transition pathways for Aotearoa New Zealand's dairy sector. *Journal of Rural Studies*. 2025;114:103540. <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2024.103540>
2. В Крыму значительно увеличились объемы производства молочной продукции. [The volume of dairy production in Crimea has increased significantly. [cited 2025 Jun 22]. (In Russ.)] Available from: <https://crimea.mk.ru/economics/2023/11/13/v-krymu-znachitelno-uvelichilis-obemy-proizvodstva-molochnoy-produkcii.html?ysclid=m8pjbvbjqo944349754>
3. Kilcawley KN, Faulkner H, Clarke HJ, O'Sullivan MG, Kerry JP. Factors influencing the flavour of bovine milk and cheese from grass based versus non-grass based milk production systems. *Foods*. 2018;7(3):37. <https://doi.org/10.3390/foods7030037>
4. Фефилова Л. В. Влияние кормов на качество молока. Форум молодых ученых. 2020. № 12. С. 533–535. [Fefilova LV. The effect of feed on milk quality. Forum of Young Scientists. 2020;12(52):533–535. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/HJYCPB>
5. Global Food Trends Report 2023/2024. Food & Agriculture Organization [Internet]. [cited 2025 Jun 22]. Available from: www.fao.org/reports/food-trends
6. Прагульгов А. Б., Бекбузаров М. А. Демографические показатели в системе регулирования продовольственного рынка Ингушетии. Региональная экономика: теория и практика. 2009. № 21. С. 57–60. [Pragulgov AB, Bekbuzarov MA. Demographic indicators in the system of food market regulation in Ingushetia. Regional Economics: Theory and Practice. 2009; 24(114):57–60. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/KOZXLV>
7. Ермолаев В. А. Роль межкультурных гастрономических различий в формировании толерантного и интолерантного общества. Известия Самарского научного центра Российской академии наук. Социальные, гуманитарные, медико-биологические науки. 2023 Т. 25. № 1. С. 70–78. [Ermolaev V.A. The role of intercultural gastronomic differences in the formation of a tolerant and intolerant society. News of the Samara Science Centre of the Russian Academy of Sciences. Social, Humanitarian, and Biomedical Sciences. 2023;25(1):70–78. (In Russ.)] <https://doi.org/10.37313/2413-9645-2023-25-88-70-78>
8. Дорофеева З. Е., Козырева П. М. Трансформация практик вовлеченности родителей в жизнь детей. Социологические исследования. 2023. № 8. С. 86–100. [Dorofeeva ZE, Kozyreva PM. Transformation of parental involvement practices in children's lives. Sociological Studies. 2023;8:86–100. (In Russ.)] <https://doi.org/10.31857/S013216250027370-0>
9. Бурдьё П. Различение: социальная критика суждения. Западная экономическая социология: Хрестоматия современной классики. М.: РОССПЭН, 2004. С. 537–568. [Bourdieu P. Distinction: a social critique of judgment. Western Economic Sociology: A textbook of modern classics. Moscow: ROSSPAN; 2004. pp. 537–568. (In Russ.)]
10. Ярош О. Б., Калькова Н. Н. Роль сувенирной продукции в товарном позиционировании туристического региона. Регионология. 2022. Т. 30. № 3. С. 647–672. [Yarosh OB, Kalkova NN. The role of souvenir products in the product positioning of a tourist region. Regionology. 2022;30(3):647–672. (In Russ.)] <https://doi.org/10.15507/2413-1407.120.030.202203.647-672>
11. Гидденс Э. Устроение общества: Очерк теории структуризации. М.: Академический проект, 2005. 528 с. [Giddens E. Organization of society: An essay on the theory of structuration. Moscow: Academic The Project; 2005. 528 p. (In Russ.)]
12. Llewellyn CH, van Jaarsveld CH, Boniface D, Carnell S, Wardle J. Eating rate is a heritable phenotype related to weight in children. *American Journal of Clinical Nutrition*. 2008;88(6):1560–1566. <https://doi.org/10.3945/ajcn.2008.26175>
13. Birch L, Savage JS, Ventura A. Influences on the development of children's eating behaviours: from infancy to adolescence. *Canadian Journal of Dietetic Practice and Research*. 2007;68(1):s1–s56.
14. Ebringer L, Ferencik M, Krajcovic J. Beneficial health effects of milk and fermented dairy products – review. *Folia Microbiol. (Praha)*. 2008;53:378–394. <https://doi.org/10.1007/s12223-008-0059-1>
15. Bittante G, Amalfitano N, Bergamaschi M, Patel N, Haddi M-L, et al. Composition and aptitude for cheese-making of milk from cows, buffaloes, goats, sheep, dromedary camels, and donkeys. *Journal of Dairy Science*. 2022;105:2132–2152. <https://doi.org/10.3168/jds.2021-20961>
16. Морозова Е. А., Котов Р. М., Пастухова Е. Я., Егорова Н. М. Продовольственный риск снижения качества жизни населения региона. Техника и технология пищевых производств. 2024. Т. 54. № 4. С. 837–847. [Morozova EA, Kotov RM, Pastukhova EYa, Egorova NM. The food risk as an indicator pf the quality of life in the region. Food Processing: Techniques and Technology. 2024;54(4):837–847. (In Russ.)] <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-4-2544>
17. Weaver CM. How sound is the science behind the dietary recommendations for dairy? *The American Journal of Clinical Nutrition*. 2014;99(5):1217S–1222S. <https://doi.org/10.3945/ajcn.113.073007>
18. Dror D, Allen L. Dairy product intake in children and adolescents in developed countries: trends, nutritional contribution, and a review of association with health outcomes. *Nutrition Reviews*. 2014;72(2):68–81. <https://doi.org/10.1111/nure.12078>
19. Krebs-Smith SM, Guenther PM, Subar AF, Kirkpatrick SI, Dodd KW. Americans do not meet federal dietary recommendations. *Journal of Nutrition*. 2010;140(10):1832–1838. <https://doi.org/10.3945/jn.110.124826>
20. Rabiei S, Zahedi M, Abtahi M, Doustmohammadian A, Dadkhahet M, et al. Consumption of milk and dairy products in Iranian population; barriers and facilitators. *Clinical Nutrition Open Science*. 2021;38:1–23. <https://doi.org/10.1016/j.nutos.2021.05.002>

21. Kanwar JR, Kanwar RK, Sun X, Punj V, Matta H, *et al.* Molecular and biotechnological advances in milk proteins in relation to human health. *Current Protein and Peptide Science*. 2009;10(4):308–338. <https://doi.org/10.2174/138920309788922234>
22. Johansson I, Lif Holgersson P. Milk and oral health. *Nestle Nutrition workshop series. Paediatric programme*. 2011; 67:55–66. <https://doi.org/10.1159/000325575>
23. Kurajdová K, Tábořecká-Petrovičová J, Kaščáková A. Factors influencing milk consumption and purchase behavior – evidence from Slovakia. *Procedia Economics and Finance*. 2015;34:573–580. [https://doi.org/10.1016/S2212-5671\(15\)01670-6](https://doi.org/10.1016/S2212-5671(15)01670-6)
24. Wardle J, Haase AM, Steptoe A, Nillapun M, Jonwutiwes K, *et al.* Gender differences in food choice: The contribution of health beliefs and dieting. *Annals of Behavioral Medicine*. 2004;27(2):107–116. https://doi.org/10.1207/s15324796abm2702_5
25. Cattaneo C, Spinelli S, Dinnella C, Proserpio C, Monteleone E, *et al.* Patterns of sensory and hedonic responses for salty and umami tastes and their impact on food familiarity, consumption, and nutritional status: A gender-based analysis from a large population sample. *Current Research in Food Science*. 2025;10:100970. <https://doi.org/10.1016/j.crf.2025.100970>
26. Konuspayeva G, Baubekova A, Akhmetsadykova S, Faye B. Traditional dairy fermented products in Central Asia. *International Dairy Journal*. 2023;137:105514. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2022.105514>
27. Фролов Д. А. Модели потребительского поведения. *Экономика и социум*. 2022. №6. С. 725–728. [Frolov DA. Models of consumer behavior. *Economics and society*. 2022;(6):725–728. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/QROPCQ>
28. Юлдашева О. У., Трушников И. О., Шубаева В. Г. Ценность шоппинга и привлекательность атрибутов торгового центра: поколенческие и гендерные различия российских покупателей. *Управленец*. 2024. Т. 15. № 3. С. 3–19. [Yuldasheva OU, Trushnikova IO, Shubaeva VG. Shopping value and mall attributes: Generational and gender differences among Russian customers. *The manager*. 2024;15(3):3–19. (In Russ.)] <https://doi.org/10.29141/2218-5003-2024-15-3-1>
29. Молодежь предпочитает не кефир, а десерт и диктует свои условия. [Young people prefer dessert rather than kefir and dictate their own terms. [cited 2025 Jun 22]. (In Russ.)] Available from: <https://dairynews.ru/interview/molodezh-predpochitaet-ne-kefir-a-desert-i-diktuet.html>
30. Каптерев А. И., Ромашкова О. Н., Чискидов С. В. Опыт применения факторного и кластерного анализа в цифровой трансформации образования. *Вестник МГПУ. Серия «Информатика и информатизация образования»*. 2022. № 4. С. 29–43. [Kapterev AI, Romashkova ON, Chiskidov SV. Experience in the application of factor and cluster analysis in the digital transformation of education. *MCU Journal of the Informatics and Informatization of Education*. 2022;(4):29–43. (In Russ.)] <https://doi.org/10.25688/2072-9014.2022.62.4.03>
31. Burton T. Identification of recreation types through cluster analysis. *Society and Leisure*. 1971;1:47–65.
32. Ермолаев Г. Н. Кластерный анализ на стадии сегментирования в процессе маркетинговых исследований. *Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук*. 2010. №12. С. 153–156. [Ermolaev GN. Cluster analysis at the stage of segmentation in the process of marketing research. *Actual problems of the humanities and natural sciences*. 2010;12:153–156. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/NUMEQT>
33. Гриценко Г. Д. Социальное конструирование общероссийской идентичности на Северном Кавказе: состояние и перспективы. *Регионология*. 2024. Т. 32. № 2. С. 446–462. [Gritsenko GD. Social construction of the all-Russian identity in the North Caucasus: state and prospects. *Regionology*. 2024;32(2):446–462. (In Russ.)] <https://doi.org/10.15507/2413-1407.128.032.202403.446-462>

Дополнительная информация об авторах / Additional information about the authors

Калькова Наталья Николаевна / Natalia N. Kalkova ORCID 0000-0002-7339-9935; eLIBRARY SPIN 8803-9143
Ярош Ольга Борисовна / Olga B. Yarosh ORCID 0000-0001-9663-2528; eLIBRARY SPIN 7140-3642
Бабак Светлана Евгеньевна / Svetlana E. Babak ORCID 0009-0003-6805-5390; eLIBRARY SPIN 6230-1882

<https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-1-2631>
<https://elibrary.ru/MEXSTP>

Оригинальная статья
<https://fptt.ru>

Исследование влияния некоторых кислот на процесс растворимости фолиевой кислоты



М. Е. Лобзанова, А. С. Сухих^{ORCID},
О. Г. Альтшулер^{ORCID}, С. А. Иванова^{ORCID*}

Кемеровский государственный университет^{ORCID}, Кемерово, Россия

Поступила в редакцию: 15.12.2025

Принята после рецензирования: 10.02.2026

Принята к публикации: 03.03.2026

*e-mail: pavvm2000@mail.ru

© М. Е. Лобзанова, А. С. Сухих, О. Г. Альтшулер,
С. А. Иванова, 2026



Аннотация.

В современном мире проблема дефицита микронутриентов остается актуальной для населения разных стран мира. Одним из эффективных решений является обогащение пищевых продуктов витаминами и минералами. Фолиевая кислота (витамин В₉) играет ключевую роль в профилактике различных заболеваний, включая дефекты нервной трубки у новорожденных. Однако эффективность обогащения продуктов напрямую зависит от биодоступности и растворимости вносимого компонента. Цель исследования – изучить влияние свойств водных растворов некоторых кислот на растворимость фолиевой кислоты как фактор ее биодоступности.

Объекты исследования – фолиевая кислота и ее растворы в воде, содержащей лимонную, аскорбиновую, янтарную и солюбилизованную аминокислоты разной концентрации (3, 5 и 10 %). Для оценки растворимости фолиевой кислоты в растворах использовали УФ-спектроскопию и ВЭЖХ. Полученные данные обрабатывали статистическими методами.

Проведенный анализ показал значительное влияние среды на растворимость фолиевой кислоты. Исследование подтвердило, что выбор среды растворения критически важен для повышения биодоступности фолиевой кислоты при обогащении пищевых продуктов. При изучении влияния растворов кислот на растворимость фолиевой кислоты в стандартных условиях установлено, что наибольшим потенциалом обладал 10 % водный раствор солюбилизованной аминокислоты (глицина). В исследовании этому раствору соответствовала наибольшая интенсивность поглощения фолиевой кислоты, превосходящая значения, соответствующие ее водному раствору, и наибольшая степень высвобождения фолиевой кислоты. Характер кривых поглощения указывал на равномерное распределение молекул в растворе и стабильность растворенной формы.

Полученные результаты могут быть использованы для оптимизации технологий обогащения продуктов питания фолиевой кислотой, что позволит повысить эффективность профилактики фолиевоедефицитных состояний среди населения.

Ключевые слова. Фолиевая кислота, микронутриенты, водный раствор кислоты, глицин, растворимость, УФ-спектроскопия

Для цитирования: Лобзанова М. Е., Сухих А. С., Альтшулер О. Г., Иванова С. А. Исследование влияния некоторых кислот на процесс растворимости фолиевой кислоты. Техника и технология пищевых производств. 2026. Т. 56. № 1 С. 154–163.
<https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-1-2631>

Effect of Acidic Media on Folic Acid Solubilization Patterns



Marina E. Lobzanova, Andrey S. Sukhikh[✉],
Olga G. Altshuler[✉], Svetlana A. Ivanova*[✉]

Kemerovo State University[✉], Kemerovo, Russia

Received: 15.12.2025
Revised: 10.02.2026
Accepted: 03.03.2026

*e-mail: pavvm2000@mail.ru
© M.E. Lobzanova, A.S. Sukhikh, O.G. Altshuler, S.A. Ivanova, 2026



Abstract.

Availability of micronutrients remains a major global concern. Fortified foods are inherently rich in vitamins and minerals; for instance, folic acid, or vitamin B₉, is essential for preventing such health issues as neural tube defects in newborns. However, the efficacy of functional food depends on the bioavailability and solubility of the fortifying nutrients.

This study focused on the solubility folic acid in aqueous solutions with citric, ascorbic, and succinic acids at various concentrations (3, 5, and 10%). The methods of UV spectroscopy and high-performance liquid chromatography (HPLC) were employed to analyze the solubility of folic acid, with the resulting data processed using standard statistical methods.

The dissolution medium had a reliable impact on the solubility of folic acid. Selecting an appropriate dissolution medium proved crucial for enhancing the bioavailability of folic acid in food fortification. The 10% aqueous solution of aminoacetic acid (glycine) demonstrated the greatest potential under standard conditions. This solution achieved the highest levels of folic acid absorption and release, surpassing those for the aqueous solution of folic acid. The absorption curves suggested a uniform molecular distribution within the solution, as well as the stability of the dissolved form.

The results can be used to optimize existing food fortification technologies, thereby helping to prevent folic acid deficiency.

Keywords. Folic acid, micronutrients, aqueous acid solution, glycine, solubility, UV spectroscopy

For citation: Lobzanova ME, Sukhikh AS, Altshuler OG, Ivanova SA. Effect of Acidic Media on Folic Acid Solubilization Patterns. Food Processing: Techniques and Technology. 2026;56(1):154–163. (In Russ.) <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-1-2631>

Введение

С дефицитом микронутриентов сталкиваются миллионы людей по всему миру как в странах с низким, так и с высоким уровнем дохода [1, 2]. Основными причинами этого являются недостаточное потребление пищи, низкое качество рациона, ограниченная биодоступность питательных веществ, а также последствия инфекционных заболеваний [3]. Наиболее распространенными состояниями считаются дефициты витаминов А, D, фолиевой кислоты (B₉), кобаламина (B₁₂), йода и др. [4]. Устранить дефицит микро- и макроэлементов у населения возможно, сочетая коррекцию рациона питания, использование биологически активных добавок и изменение образа жизни [5].

Обогащение продуктов питания сыграло важную роль в решении проблемы дефицита микроэлементов во всем мире. Наиболее успешный пример – йодированная соль, которая была введена в Швейцарии в 1920-х гг. и позднее стала использоваться во всем мире [6]. Благодаря йодированной соли распространенность йододефицитных заболеваний в мире снизилась на 70 %, что позволило предотвратить около 750 млн случаев зоба [2]. Распространенность дефектов нервной трубки снизилась на 31 % в странах, где было введено

обязательное обогащение продуктов питания фолиевой кислотой. Так, в США и Канаде отмечено значительное снижение частоты расщепления позвоночника и анэнцефалии [7]. Обогащение молока витамином D послужило основой для профилактики рахита и улучшения здоровья костей. В Канаде, США и Финляндии давно введены программы по обогащению продуктов витамином D, что привело к улучшению его уровня у населения [8]. В странах с низким уровнем дохода (например в Нигерии) обогащение растительного масла витамином помогло снизить случаи детской слепоты и риск иммунодефицита [9].

Польза фолиевой кислоты и родственных ей соединений (фолатов) для здоровья выходит далеко за рамки предотвращения дефектов нервной трубки и заболеваний сосудов [10–12]. Известно, что различные нарушения, связанные с уровнем фолиевой кислоты, в т. ч. аллельные вариации в генах, кодирующих фолатзависимые ферменты, включают и другие дефекты: «волчья пасть», различные виды рака, болезнь Альцгеймера, аффективные расстройства, синдром Дауна и др. [13–17]. Большинство из этих нарушений объясняются в контексте фолатзависимых реакций переноса одного углевода, включающих биосинтез метионина, пурина

и пиримидина. Однако точная первопричина связана с одним или несколькими распространенными полиморфизмами гена *ahcy* цикла реметилирования, которые изменяют распределение фолата в клетках; низким потреблением фолата с пищей или нарушением синтеза ДНК и экспрессии генов, связанных с метаболизмом фолата. Комбинация всех этих факторов может усилить предрасположенность и спровоцировать заболевание [13].

Уже доказано, что наиболее эффективным способом предотвращения всех ранее перечисленных заболеваний является обязательное применение фолиевой кислоты как до, так и во время беременности. Преимущества профилактики заболеваний, по сравнению с затратами на их лечение, делают необходимым обогащение продуктов питания фолиевой кислотой [10]. Обогащение основных продуктов питания фолиевой кислотой обеспечивает ее поступление в организм как женщин репродуктивного возраста, так и представителей других категорий населения без необходимости менять образ жизни [18–19]. Дозы фолиевой кислоты не менее 400 мкг в день гарантируют более высокую окупаемость инвестиций в программы обязательного обогащения пищевых продуктов питания [20].

Во многих странах внедрены программы обязательного обогащения пищевых продуктов фолиевой кислотой для устранения дефицита данного микроэлемента [21]. Существует практика обогащения фолиевой кислотой таких продуктов питания, как пшеничная мука, хлебобулочные изделия, соль, масло, рис, сахар, кофе и др. [4, 22]. Несмотря на некоторые усилия по витаминизации, распространенность дефицита фолиевой кислоты по-прежнему остается высокой. Обогащение продуктов питания становится важной стратегией для решения проблемы дефицита микроэлементов и улучшения здоровья населения [23–25]. Эффективность обогащения продуктов питания зависит от стабильности и биодоступности добавляемых микроэлементов. Стабильность определяется способностью пищевого компонента поддерживать свою эффективность при хранении и / или обработке, а биодоступность – степенью усвоения и использования организмом. Высокая растворимость компонента позволяет достичь равномерного распределения компонента в пищевом продукте и повышает эффективность обогащения [2].

Для повышения растворимости труднорастворимых веществ применяют физические или химические методы, солюбилизацию, косольвентные системы, сверхкритические технологии, нанотехнологии [26]. Преобразование вещества в водорастворимую соль (например в гидрохлорид) является одним из наиболее эффективных способов повышения растворимости таких веществ, особенно в фармацевтике [27].

Цель исследования – изучить влияние свойств водных растворов некоторых кислот на растворимость фолиевой кислоты как фактор ее биодоступности.

Объекты и методы исследования

Объектами исследования послужили фолиевая кислота (Qingdao Samin chemical Co., Ltd, Циндао, Китай) и ее растворы в воде, содержащей лимонную, аскорбиновую, янтарную и солюбилизированную аминокислоту разной концентрации (3, 5 и 10 %). Образцы растворов готовили следующим образом: при комнатной температуре в воду и растворы лимонной ($C_6H_8O_7$), аскорбиновой ($C_6H_8O_8$), янтарной ($C_4H_6O_4$) и солюбилизированной аминокислоты ($C_2H_5NO_2$) кислот в заданной концентрации вносили фолиевую кислоту ($C_{19}H_{19}N_7O_6$) согласно рекомендациям [28]. Использованные реагенты соответствовали аналитической степени чистоты и были приобретены у различных производителей: лимонная кислота (Барселона, Испания); аскорбиновая и янтарная кислота (PanReas AppliChem, Кастельяр-дель-Вальес, Испания); солюбилизированная аминокислотная кислота – глицин (Qingdao Samin chemical Co., Ltd, Циндао, Китай).

Приготовление растворов. Все растворы использовали свежеприготовленными. Раствор фолиевой кислоты готовили в соответствии с требованиями ФС.2.1.0686 «Фолиевая кислота» [29]. В мерную колбу вместимостью 50 мл помещали навеску 50 мг фолиевой кислоты, растворяли в 2,5 мл растворителя и доводили объем раствора подвижной фазой до метки, после чего тщательно перемешивали до однородности. 2,0 мл полученного раствора помещали в мерную колбу вместимостью 10 мл и доводили объем раствора подвижной фазой до метки. В качестве растворителя фолиевой кислоты использовали дистиллированную воду и водные растворы лимонной, аскорбиновой, янтарной и солюбилизированной аминокислот. Для получения основного раствора 200 мг фолиевой кислоты вносили в 100 мл 0,01 М раствора гидроксида натрия, приготовленного по ФС.2.1.0686 «Фолиевая кислота» [29]. Навески 3, 5 и 7 г лимонной, аскорбиновой, янтарной и солюбилизированной аминокислот растворяли в 10 мл дистиллированной воды, объем доводили дистиллированной водой до получения растворов с концентрацией 3, 5 и 10 % соответственно.

УФ-спектроскопия. УФ-спектры регистрировали с помощью спектрофотометра СФ-2000 (ЗАО «ОКБ Спектр», Санкт-Петербург, Россия) [29, 30]. Исследования проводили при постоянной температуре 22,3 °С и относительной влажности 33 %. В кювету из кварца помещали растворитель (воду или раствор кислоты) и регистрировали спектры в выбранном диапазоне длин волн. Эталонный спектр использовали для вычитания фоновых помех. В отдельную кювету помещали приготовленный раствор фолиевой кислоты. Оптическую плотность (D) фиксировали на каждой длине волны. Спектры регистрировали в том же диапазоне, что и эталонный образец. Сканирование проводили от 200 до 450 нм с шагом 1–2 нм. Все измерения выполняли трехкратно.

Уровень фолиевой кислоты в растворах. Количество высвободившейся в раствор фолиевой кислоты определяли в соответствии с процедурой, описанной в МВИ.МН 2146-2004 «Методика определения фолиевой кислоты в обогащенных продуктах питания» [31], с помощью метода ВЭЖХ на хроматографе ShimadzuLC-20 Prominence (Shimadzu Corporation, Киото, Япония) с диодно-матричным детектором Shimadzu SPD20MA (Shimadzu Corporation, Киото, Япония), колонкой HyperClone 5 мкм BDS C-18 250×4,6 мм (Phenomenex, Торранс, США). Подвижная фаза состояла из бидистиллированной воды (рН 2,9) и ацетонитрила. Для установления рН 2,9 использовали раствор серной кислоты 1:10, рН водного раствора измеряли с помощью иономер. Из основного стандартного раствора фолиевой кислоты готовили рабочий стандартный раствор кислоты с концентрацией 200 мкг/см³. Для этого отбирали 10 см³ основного стандартного раствора, переносили в мерную колбу на 100 см³ и доводили раствором 0,01М NaOH до метки. Температура колонки составляла 25 °С. Детектирование проводили при длине волны 286 нм и ширине оптической полосы 20 нм после градиентного элюирования экстракта на хроматографической колонке, скорость потока составляла 1 мл/мин.

Числовые значения, полученные в ходе исследования, подвергали первичному статистическому анализу с помощью функционала Microsoft Office Excel 2007. Данные представили средним значением ± стандартное отклонение. Критерием Стьюдента оценивали однородность распределения выборок эмпирических данных. Для определения статистически значимых различий между средними значениями использовался однофакторный дисперсионный анализ (ANOVA). Уровень достоверности статистических различий между контрольной и экспериментальными группами растворов был оценен с помощью критерия Тьюки ($p < 0,05$).

Результаты и их обсуждение

УФ-спектроскопия является мощным инструментом изучения электронных переходов в атомах и молекулах и находит широкое применение в исследованиях химии, биохимии и молекулярной биологии, фармацевтике, экологии и других областях. Метод активно используется в аналитической химии для изучения молекулярных взаимодействий и изменений электронных состояний. Измерение поглощения ультрафиолетового излучения образцами позволило получить информацию о модификации свойств молекулярной структуры при изучении растворимости фолиевой кислоты в присутствии водных растворов кислот, применяемых в пищевой промышленности и фармацевтике, в т. ч. при производстве пищевых добавок. На рисунке 1 представлен УФ-спектр водного раствора фолиевой кислоты без добавок, полученный в диапазоне 190–450 нм и позволяющий выявить все ключевые особенности поглощения [29].

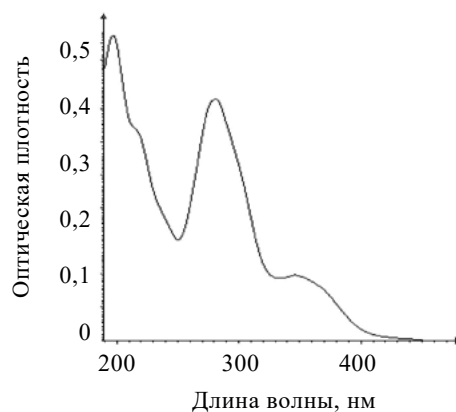


Рисунок 1. УФ-спектр водного раствора фолиевой кислоты (без добавок)

Figure 1. UV spectrum of aqueous folic acid solution (without additives)

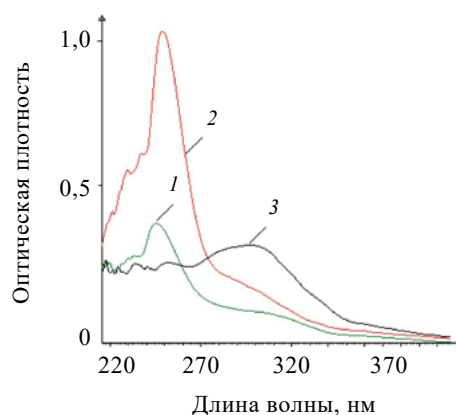


Рисунок 2. УФ-спектр фолиевой кислоты в водном растворе лимонной кислоты: 1 – 3 %; 2 – 5 %; 3 – 10 %

Figure 2. UV spectrum of folic acid in aqueous citric acid solution: 1 – 3%; 2 – 5%; and 3 – 10%

На графике УФ-спектра водного раствора фолиевой кислоты отражена характерная волнообразная кривая с двумя выраженными пиками, с постепенным снижением оптической плотности после последнего, что типично для УФ-спектров органических соединений [32]. Основные максимумы поглощения (λ_{max}) соответствовали 281 и 354 нм. Первый пик связан с электронными переходами в гетероциклической структуре фолиевой кислоты, второй пик (менее интенсивный, чем первый) указывает на дополнительные электронные переходы. Характерная форма спектра без аномальных пиков или шумов, отсутствие существенных отклонений в области 200–380 нм подтверждают чистоту исследуемых образцов водного раствора фолиевой кислоты без признаков деградации.

На рисунке 2 представлен УФ-спектр фолиевой кислоты в водном растворе лимонной кислоты с различной массовой долей.

Для лимонной кислоты 3 % пик поглощения фолиевой кислоты менее выражен и смещен в коротковолновую область, что может свидетельствовать о недостаточности концентрации лимонной кислоты для обеспечения оптимального микроокружения для молекулы фолиевой кислоты (слабая сольватация фолиевой кислоты). В спектре раствора лимонной кислоты 5 % наблюдался максимальный и острый пик поглощения, положение близко к эталонному с большей интенсивностью [29]. Пик спектра в растворе лимонной кислоты 10 % стал ниже и шире, зарегистрировано смещение в длинноволновую область (батохромный сдвиг), что указывает на уменьшение оптической плотности при той же концентрации фолиевой кислоты (гипохромный эффект). Резкий подъем в коротковолновой области спектра и плавное снижение после максимума типичны для органических кислот. Для всех рассмотренных случаев оптическая плотность стремилась к нулю в длинноволновой области (выше 320–400 нм), что подтверждает отсутствие существенного поглощения в видимой области. Лимонная кислота изменяет сольватное окружение фолиевой кислоты, подкисляя раствор, влияя на ионизацию и растворимость фолиевой кислоты. Увеличение лимонной кислоты до 5 % не повлияло на структуру фолиевой кислоты, но увеличило интенсивность ее поглощения в растворе: образовавшиеся соли фолиевой кислоты привели к увеличению растворимости. Образование водородных связей между молекулами лимонной и фолиевой кислот начиналось при концентрации лимонной кислоты 10 %, это подтверждает изменение вида спектра поглощения. Узкий пик спектра (5 % лимонная кислота) указывает на однородность раствора, широкий пик спектра (10 % лимонная кислота) подтверждает неоднородность раствора, возможно выпадение осадка или образование ассоциатов.

На рисунке 3 представлен УФ-спектр фолиевой кислоты в водном растворе аскорбиновой кислоты с различной массовой долей.

Все спектры соответствовали единой динамике, но имели разную интенсивность с тенденцией снижения в образцах растворов при увеличении концентрации аскорбиновой кислоты. Пики поглощения в УФ-спектрах фолиевой кислоты в 3, 5 и 10 % растворах аскорбиновой кислоты близки к эталонным максимумам (в воде) по положению в коротковолновом диапазоне и форме (почти симметричны). При этом по мере увеличения концентрации аскорбиновой кислоты наблюдается уменьшение высоты пиков и расширение их основания [29]. Резкий подъем в коротковолновой области и плавное снижение после максимума является типичным для органических кислот. Во всех случаях оптическая плотность стремилась к нулю в длинноволновой части диапазона (более 350 нм), что подтверждает отсутствие существенного поглощения в видимой области. Изменение ширины пика спектра поглощения при увеличении концентрации

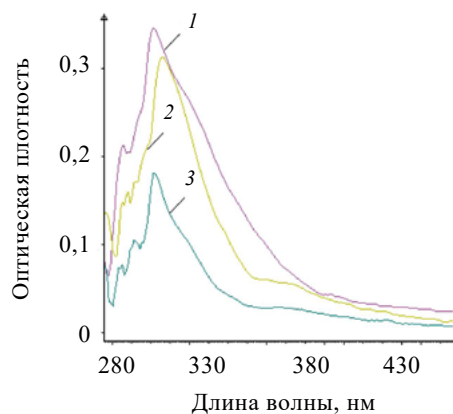


Рисунок 3. УФ-спектр фолиевой кислоты в водном растворе аскорбиновой кислоты: 1 – 3 %; 2 – 5 %; 3 – 10 %

Figure 3. UV spectrum of folic acid in ascorbic acid aqueous solution: 1 – 3%; 2 – 5%; and 3 – 10%

аскорбиновой кислоты с 3 до 10 % соответствовало динамике однородности раствора и степени сольватации. При 3 % растворе аскорбиновой кислоты наблюдалась максимальная высота пика, что свидетельствует о наибольшей степени растворения фолиевой кислоты и минимальном образовании агрегатов или комплексов. Дальнейшее увеличение концентрации аскорбиновой кислоты до 5 и 10 % приводило к значительному уменьшению интенсивности поглощения, указывая на уменьшение растворимости фолиевой кислоты и возможное начало образования нерастворимых комплексов. Рассматриваемый диапазон концентраций (3–10 %) аскорбиновой кислоты не способствовал усилению сольватации фолиевой кислоты, сохраняя ее ограниченную растворимость. Более того, увеличение концентрации приводило к снижению интенсивности спектра и, следовательно, снижению растворимости, вызванному изменением ионизации фолиевой кислоты из-за повышенной кислотности раствора.

На рисунке 4 представлен УФ-спектр фолиевой кислоты в водном растворе янтарной кислоты различной массовой доли.

Во всем диапазоне длин волн интенсивность поглощения демонстрировала общий убывающий характер: скорость снижения различалась в коротковолновой части, где интенсивность была достаточно низкой. Во всех случаях оптическая плотность стремилась к нулю в длинноволновой области, что подтверждает отсутствие существенного поглощения в видимой области спектра. В 3 % растворе янтарной кислоты наблюдалось быстрое снижение интенсивности с последующим сохранением низких значений в широком диапазоне длин волн (до 430 нм и выше). При 10 % концентрации янтарной кислоты кривая характеризовалась более плавным снижением интенсивности поглощения фолиевой кислоты во всем рассматри-

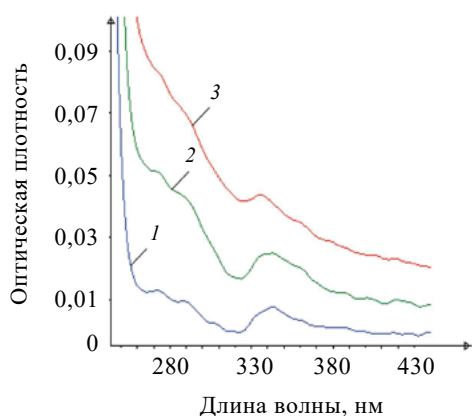


Рисунок 4. УФ-спектр фолиевой кислоты в водном растворе янтарной кислоты: 1 – 3 %; 2 – 5 %; 3 – 10 %

Figure 4. UV spectrum of folic acid in succinic acid aqueous solution: 1 – 3%; 2 – 5%; and 3 – 10%

ваемом диапазоне длины волн. Концентрация 3–10 % янтарной кислоты в водном растворе не только не привела к увеличению растворимости фолиевой кислоты, но и вызвала трансформацию ее структуры из-за изменения сольватного окружения ее молекул и / или образования агрегатов и комплексов между молекулами фолиевой и янтарной кислот. Меньшая интенсивность спектра, в сравнении с эталонным спектром фолиевой кислоты в воде, указывает на отсутствие в растворе молекул фолиевой кислоты в свободной форме и, следовательно, на достижение результата, противоположного поставленной цели.

На рисунке 5 представлен УФ-спектр фолиевой кислоты в водном растворе солюбилизированной аминокислоты (глицина) различной массовой доли.

Во всех исследованных растворах глицина различной концентрации интенсивность поглощения фолиевой кислоты плавно снижалась при переходе от коротких к длинным волнам, что характерно для УФ-спектров органических соединений. Самая низкая интенсивность и наиболее резкое падение интенсивности наблюдались для 3 % раствора глицина; среднее положение интенсивности поглощения фолиевой кислоты занимала кривая, соответствующая 5 % раствору глицина; наибольшая интенсивность поглощения в коротковолновой области с более плавным снижением – в 10 % растворе глицина. Отсутствие ярко выраженного пика, в отличие от классического спектра фолиевой кислоты в воде (рис. 1), может указывать на изменение сольватного окружения молекулы фолиевой кислоты или возможное образование комплексов либо агрегатов между молекулами фолиевой кислоты и глицина. Размытие пиков поглощения связано с взаимодействием фолиевой кислоты с глицином, изменением ее микроокружения и элек-

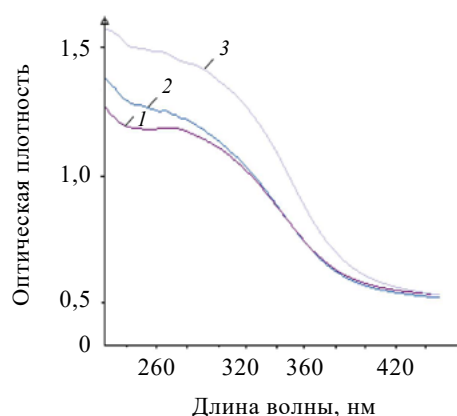


Рисунок 5. УФ-спектр фолиевой кислоты в водном растворе солюбилизированной аминокислоты (глицина): 1 – 3 %, 2 – 5 %; 3 – 10 %

Figure 5. UV spectrum of folic acid in glycine aqueous solution: 1 – 3%, 2 – 5%; and 3 – 10%

тронных свойств. Увеличение максимальной интенсивности поглощения отражает рост концентрации свободно растворенной фолиевой кислоты. Улучшение растворимости фолиевой кислоты наблюдалось при увеличении концентрации глицина с 3 до 10 % за счет образования стабильных водородных связей с глицином, уменьшения агрегации из-за конкурирующего взаимодействия с растворителем либо изменения pH раствора (глицин обладает буферными свойствами).

В обычных условиях фолиевая кислота практически нерастворима в воде и образует осадок желтоватого оттенка [33]. Для увеличения ее растворимости и проведения УФ-спектроскопии фолиевую кислоту добавляли в водный раствор гидроксида натрия (NaOH) [29]. NaOH повышает растворимость фолиевой кислоты за счет химического превращения молекулы в водорастворимую форму и изменения ее физико-химических свойств [34]. Для выявления способности растворов кислот (лимонной, аскорбиновой, янтарной, солюбилизированной аминокислотой) повышать растворимость фолиевой кислоты определяли долю фолиевой кислоты, высвободившуюся в образцах водных растворов (табл.).

Полученные данные подтвердили наличие необходимых характеристик (увеличение растворимости фолиевой кислоты) у глицина: его 10 % концентрация в водном растворе обеспечила статистически сопоставимое действие с подтвержденным усилителем растворимости – раствором гидроксида натрия.

I.R. Younis *et al.* тестировали аптечные препараты фолиевой кислоты (включая 7 монопрепаратов) на растворимость в дистиллированной воде (pH 5–6), в имитации желудочного (pH 1,5) и кишечного сока (pH 7,5). В дистиллированной воде все образцы монопрепаратов фолиевой кислоты удовлетворяли нормативным требованиям (растворимость не менее 75 % за 45 мин),

Таблица. Количество фолиевой кислоты в образцах исследуемых растворов, мг/100мл

Table. Folic acid across samples, mg/100 mL

Растворитель	Концентрация, %			
	0	3	5	10
Лимонная кислота	–	0,250 ± 0,002	0,461 ± 0,002	0,670 ± 0,002
Аскорбиновая кислота	–	0,593 ± 0,002	0,545 ± 0,002	0,311 ± 0,002
Янтарная кислота	–	0,017 ± 0,002	0,068 ± 0,002	0,120 ± 0,002
Солюбилизированная аминокислотная кислота (глицин)	–	2,821 ± 0,002	3,063 ± 0,002	23,731 ± 0,002*
Дистиллированная вода	25,00 ± 0,003	–	–	–

Примечания: данные представлены как среднее ± стандартное отклонение (n = 3); * – значения значимо не отличаются от контроля (водный раствор фолиевой кислоты с гидроксидом натрия) ($p > 0,05$, критерий Тьюки).

Note: mean ± standard deviation (n = 3); * – the results remained statistically similar to the control group (aqueous folic acid solution with sodium hydroxide), Tukey's test.

диапазон растворения составил 85–143 %. В растворе, имитирующем кишечную жидкость, профиль растворения для каждого монопродукта фолиевой кислоты был аналогичен профилю растворения в дистиллированной воде, диапазон растворения – 89–135 %. Однако в кислой среде растворимость всех препаратов была ниже необходимой – 23–68 %. Более того, требуемый показатель растворимости не был достигнут и при увеличении продолжительности процесса до 60 мин. Эти результаты подтверждают, что pH среды оказывает значительное влияние на процесс растворения препаратов с фолиевой кислотой, растворимость которой увеличивается при смещении pH из кислой среды в щелочную [35]. Данное утверждение нашло экспериментальное подтверждение: при температуре 37 °C концентрация растворов оставалась стабильной в течение 5 дней, значимого разрушения вещества в исследованном диапазоне pH не наблюдалось, при этом растворимость в кислой среде оставалась низкой, в щелочной – значительно возрастала. Установлено, что при pH 7,0 растворимость фолиевой кислоты была в 183 раза выше, чем при pH 1,0.

Недостаточное растворение фолиевой кислоты J. Đuriš *et al.* связывали с составом и / или условиями обработки. Даже при изменении pH среды с кислой на щелочную протестированные добавки – как монопрепараты фолиевой кислоты, так и многокомпонентные – не высвобождали необходимое количество фолиевой кислоты [36].

В данном исследовании растворы лимонной, аскорбиновой и янтарной кислот соответствовали кислотным средам с pH от 1,5 до 2,6, чем можно объяснить снижение растворимости фолиевой кислоты в растворах этих кислот заданных концентраций. Известно, что в кислой среде (при pH 1,5–2,6) большинство функциональных групп фолиевой кислоты находятся в протонированной (неионизированной) форме. В таком состоянии молекула становится менее полярной и хуже взаимодействует с полярным рас-

творителем. Поскольку гидрофобные взаимодействия преобладают над гидрофильными, растворимость фолиевой кислоты снижается [37, 38].

Раствор глицина имеет pH ≈ 6,1, что близко к дистиллированной воде с небольшим сдвигом в щелочную сторону. Это обусловило повышение растворимости фолиевой кислоты в рамках данного исследования.

K. Pérez-Carreón *et al.* продемонстрировали, что добавление аргенина или лизина к фолиевой кислоте значительно увеличивало ее растворимость минимум в 6000 раз [39], предположительно, вследствие образования более растворимых солей за счет электростатических кислотно-щелочных взаимодействий [40]. В настоящей работе увеличение растворимости фолиевой кислоты в растворе с глицином подчиняется аналогичной закономерности.

Растворимость фолиевой кислоты в кислой среде желудка обеспечивает биодоступность принимаемого препарата, отсутствие которой ограничивает его всасываемость в отделах тонкого кишечника. В ходе предварительного исследования [35] было установлено, что высвобождение фолиевой кислоты из капсул с буферным раствором, разработанных и изготовленных в лабораторных условиях авторами, было выше, чем из таблеток без буферного раствора при использовании метода внутреннего растворения. Растворение происходило на постоянной поверхности, не подверженной разрушению, без перемешивания, что исключало влияние других факторов. Обычно pH основной массы жидкости соответствует pH стационарного диффузионного пограничного слоя на поверхности таблетки. Следовательно, pH поверхности оказала значительное влияние на растворимость лекарственного компонента, которая являлась основным движущим фактором его растворения. В случае буферной таблетки с фолиевой кислотой наблюдалось изменение pH микросреды застойного диффузионного пограничного слоя за счет растворения буфера на поверхности, что приводило к увеличению pH до относительно более щелочного уровня (pH ≈ 4), в то время как pH основной

среды остается неизменным (рН 1,5). Повышение рН на поверхности должно способствовать улучшению растворимости фолиевой кислоты, ускоряя ее растворение из буферной таблетки. Экспериментальные данные свидетельствуют о том, что фолиевая кислота высвобождалась из буферных таблеток с более высокой скоростью, что подтверждает предположение о положительном влиянии изменения рН на растворение фолиевой кислоты. Подобные технологические решения позволяют преодолеть сложности растворимости препаратов фолиевой кислоты и увеличить их биодоступность [41].

Выводы

Обогащение пищевых продуктов фолиевой кислотой представляет собой научно обоснованный и эффективный подход к профилактике дефицита данного витамина в популяции, повышающий качество жизни. Немаловажную роль в обогащенных продуктах играет биодоступность вносимого компонента, определяемая его растворимостью. При изучении влияния растворов кислот на растворимость фолиевой кислоты в стандартных условиях установлено, что наибольшим потенциалом обладал 10 % водный раствор солилилизированной аминокислоты (глицина). В проведенных исследованиях ему соответствовала наибольшая интенсивность поглощения фолиевой кислоты, превосходящая значения, характерные для ее водного раствора, а также наибольшая степень высвобождения фолиевой кислоты, подобно присутствию раствора гидроксида натрия. При этом УФ-спектры имели более плавный характер, сохраняя

относительно высокую интенсивность в широком диапазоне длин волн (вплоть до 400 нм). Характер кривых может указывать на равномерное распределение молекул в растворе, отсутствие крупных агрегатов и / или стабильность растворенной формы фолиевой кислоты, что требует подтверждения в дополнительных исследованиях с применением других методов анализа и изучения возможных побочных эффектов совмещения фолиевой кислоты и глицина.

Критерий авторства

М. Е. Лобзанова, С. А. Сухих, О. Г. Альтшулер – исследование, методология, подготовка первоначального варианта статьи. С. А. Иванова – концептуализация, администрирование проекта, формальный анализ, рецензирование и редактирование статьи.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution

M.E. Lobzanova, S.A. Sukhikh, and O.G. Altshuler performed the research, developed the methodology, and drafted the manuscript. S.A. Ivanova developed the research concept, supervised the research provided the formal analysis, wrote the review, and proofread the manuscript.

Conflict of interest

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

Список литературы / References

1. Unnevehr LJ, Pray C, Paarlberg R. Addressing micronutrient deficiencies: Alternative interventions and technologies. *AgBioForum*. 2007;10(3):124–134.
2. Ashraf SF. Food fortification as a sustainable global strategy to mitigate micronutrient deficiencies and improve public health. *Discover Food*. 2025;(5):201. <https://doi.org/10.1007/s44187-025-00512-5>
3. Stevens GA, Beal T, Mbuya MNN, Luo H, Neufeld LM. Micronutrient deficiencies among preschool-aged children and women of reproductive age worldwide: a pooled analysis of individual-level data from population-representative surveys. *The Lancet. Global Health*. 2022;10(11):e1590–e1599. [https://doi.org/10.1016/S2214-109X\(22\)00367-9](https://doi.org/10.1016/S2214-109X(22)00367-9)
4. Biswal VL, Yashwanth BS, Murthy PS. Dietary enhancement of coffee with folic acid: A nutritional approach. *Food Chemistry*. 2025;(488):144881. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2025.144881>
5. Kiani AK, Donato K, Aquilanti B, Velluti V, Matera G, *et al.* Main nutritional deficiencies. *Journal of Preventive Medicine and Hygiene*/ 2022;63(2):e93–e101 <https://doi.org/10.15167/2421-4248/jpmh2022.63.2S3.2752>
6. Zimmermann MB, Jooste PL, Pandav CS. Iodine-deficiency disorders. *Lancet*. 2008;372:1251–1262. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(08\)61005-3](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(08)61005-3)
7. Blencowe H, Kanacherla V, Moorthie S, Darlison MW, Modell B. Estimates of global and regional prevalence of neural tube defects for 2015: a systematic analysis. *Of the New York Academy of Sciences*. 2018;1414(1):31–46. <https://doi.org/10.1111/nyas.13548>
8. Jääskeläinen T, Itkonen ST, Lundqvist A, Erkkola M, Koskela T, *et al.* The positive impact of general vitamin D food fortification policy on vitamin D status in a representative adult Finnish population: evidence from an 11-y follow-up based on standardized 25-hydroxyvitamin D data. *American journal of clinical nutrition*. 2017;105(6):1512–1520. <https://doi.org/10.3945/ajcn.116.151415>

9. Mannar MV, Hurrell RF. Food fortification in a globalized world. New York: Academic Press; 2018. 395 p. <https://doi.org/10.1016/C2014-0-03835-X>
10. Mathur PK, Dave P, Fuller SI, Cuero K, Chiu A, et al. Beneficial effects of folic acid fortification in the prevention of Spina Bifida and reducing the orthopaedic procedures: A narrative review of the current literature. *Journal of Orthopaedic Reports*. 2023;2(3):100175. <https://doi.org/10.1016/j.jorep.2023.100175>
11. Perry J, Refsum H. Prospective study of serum total homocysteine concentrations and risk of stroke in middle aged British men. *The Lancet*. 1995;346(8987):1395–1398.
12. Petri M, Roubenhoff R. Plasma homocysteine as a risk factor for atherothrombotic events in systematic lupus erythematosus. *The Lancet*. 1996;348(9035):1120–1124.
13. Lucock M. Folic acid: Nutritional biochemistry, molecular biology, and role in disease processes. *Molecular Genetics and Metabolism*. 2000;71:121–138. <https://doi.org/10.1006/mgme.2000.3027>
14. Mills JL, Kirke PN, Molloy AM, Burke H, Conley MR, et al. Methylenetetrahydrofolate reductase thermolabile variant and oral clefts. *American Journal of Medical Genetics*. 1999;86:71–74.
15. Slattery ML, Potter JD, Samowitz WD, Schaffer M. Leppert Methylenetetrahydrofolate reductase, diet, and risk of colon cancer. *Cancer Epidemiol Biomarkers Prevention*. 1999;8:513–518.
16. Clarke R, Smith AD, Jobst KA, Refsum H, Sutton L, Ueland PM. Folate, vitamin B₁₂ and serum total homocysteine levels in confirmed alzheimers disease. *Archives of Neurology*. 1998;55:1449–1455. <https://doi.org/10.1001/archneur.55.11.1449>
17. James SJ, Pogribna M, Pogribny IP, Melnyk S, et al. Abnormal folate metabolism and mutation in the methylenetetrahydrofolate reductase gene may be maternal risk factors for Down's syndrome. *American Journal of Clinical Nutrition*. 1999;70:495–501.
18. Kancherla V, Botto LD, Rowe LA, Shlobin NA, Caceres A, et al. Preventing birth defects, saving lives, and promoting health equity: an urgent call to action for universal mandatory food fortification with folic acid. *The Lancet. Global Health*. 2022;10:e1053–e1057. [https://doi.org/10.1016/s2214-109x\(22\)00213-3](https://doi.org/10.1016/s2214-109x(22)00213-3)
19. Toivonen KI, Lacroix E, Flynn M, Ronksley PE, Oinonen KA, et al. Folic acid supplementation during the preconception period: a systematic review and meta-analysis. *Preventive Medicine*. 2018;114:1–17. <https://doi.org/10.1016/j.ypmed.2018.05.023>
20. Rodrigues VB, Silva EN, Santos MLP. Cost-effectiveness of mandatory folic acid fortification of flours in prevention of neural tube defects: A systematic review. *PLoS One*. 2021;16:e0258488. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0258488>
21. Ismail S, Eljazzar S, Ganji V. Intended and unintended benefits of folic acid fortification – A narrative review. *Foods*. 2023;12(8):12081612. <https://doi.org/10.3390/foods12081612>
22. Chadare FJ, Idohou R, Nago E, Affonfere M, Agossadou J, et al. Conventional and food-to-food fortification: An appraisal of past practices and lessons learned. *Food Science and Nutrition*. 2019;7(9):2781–2795. <https://doi.org/10.1002/fsn3.1133>
23. Babich O, Larina V, Ivanova S, Tarasov A, Povydysh M, et al. Phytotherapeutic approaches to the prevention of age-related changes and the extension of active longevity. *Molecules*. 2022;27:2276. <https://doi.org/10.3390/molecules27072276>
24. Ivanova S, Prosekov A. Study of the antioxidant potential of uv-treated vegetables. *Nutraceuticals*. 2022;27:289–299. <https://doi.org/10.3390/nutraceuticals2040022>
25. Ponasenko A, Sinitsky M, Minina V, Vesnina A, Khutornaya M, et al. Response and lipid metabolism gene polymorphisms are associated with the risk of obesity in middle-aged and elderly patients. *Journal of Personalized Medicine*. 2022;12(2):238. <https://doi.org/10.3390/jpm12020238>
26. Martins ICB, Forte A, Diogo HP, Raposo LR, Baptista PV, et al. Solvent-free strategy to prepare amorphous salts of folic acid with enhanced solubility and cell permeability. *Chemistry–Methods*. 2022;2(6):e202100104. <https://doi.org/10.1002/cmt.202100104>
27. Avdeef A. Predicting solubility of new drugs. London: CRC Press; 2024. 1730 p. <https://doi.org/10.1201/9781032625256>
28. Вышковский Г. Л. Регистр лекарственных средств России. Энциклопедия лекарств. М.: РЛС, 2001. 1518 с. [Vyshkovsky GL. Register of Medicines of Russia. Encyclopedia of Medicines. Moscow: RLS; 2001. 1518 p. (In Russ.)]
29. ФС.2.1.0686. Фармакопейная статья. Фолиевая кислота. [Pharmacopoeial monograph. Folic acid. [cited 2025 Oct 10]. (In Russ.)]. Available from: <https://pharmacopoeia.regmed.ru/pharmacopoeia/izdanie-15/2/2-1/folievaya-kislota/>
30. ОФС.1.2.1.1.0003. Общая фармакопейная статья. Спектрофотометрия в ультрафиолетовой и видимой областях. [General pharmacopoeial monograph: Ultraviolet and visible spectrophotometry. [cited 2025 Oct 10]. (In Russ.)]. Available from: <https://pharmacopoeia.regmed.ru/pharmacopoeia/izdanie-15/1/1-2/1-2-1-1-1-metody-spektralnogo-analiza-spektrofotometriya-v-ultrafioletovoy-i-vidimoy-oblastyakh/>
31. МВИ. МН 2146-2004. Методика определения фолиевой кислоты в обогащенных продуктах питания. [Method for determining folic acid in fortified foods. [cited 2025 Oct 10]. (In Russ.)]. Available from: <https://meganorm.ru/Index2/1/4293736/4293736986.htm>

32. Edwards AA, Alexander BD. Organic applications of UV-visible absorption spectroscopy. Encyclopedia of Spectroscopy and Spectrometry (Second Edition). 2010;2030-2039. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374413-5.00013-0>
33. Скорик Н. А, Вострецова Е. Н. Растворимость фолиевой кислоты и некоторых синтезированных фолатов металлов. Журнал неорганической химии. 2019. Т. 64. №12. С. 1319–1325. [Skorik NA, Vostretsova EN. Solubilities of Folic Acid and Selected Synthesized Metal Folates. Russian Journal of Inorganic Chemistry. 2019;64(2):1319–1325. (In Russ.)] <https://doi.org/10.1134/S0044457X19120171>
34. Magri VR, Rocha MA, Matos CS, Petersen PAD, Leroux F, *et al.* Folic acid and sodium folate salts: Thermal behavior and spectroscopic (IR, Raman, and solid-state ^{13}C NMR) characterization. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy. 2022;273:120981. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2022.120981>
35. Younis IR, Stamatakis MK, Callery PS, Meyer-Stout PJo. Influence of pH on the dissolution of folic acid supplements. International Journal of Pharmaceutics. 2009;367(1–2):97–102. <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2008.09.028>
36. Đuriš J, Čalija B, Vidović B, Dobričić V, Milić J, *et al.* Comparative analysis of mechanical and dissolution properties of single- and multicomponent folic acid supplements. Journal of Food Composition and Analysis. 2017;60:17–24. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2017.03.005>
37. Wu KZ, Li X, Hou C, Qian Y. Solubility of folic acid in water at pH values between 0 and 7 at temperatures (298.15, 303.15, and 313.15) K. Journal of Chemical & Engineering Data. 2010;55(9):3958–3961. <https://doi.org/10.1021/jc1000268>
38. Bottari E, D'Ambrosio A, De Tommaso G, Festa MR, Iuliano M. Solubility of folic acid and protonation of folate in NaCl at different concentrations, even in physiological solution. Analyst. 2021;146(7):2339–2347. <https://doi.org/10.1039/d1an00013f>
39. Pérez-Carreón K, Martínez LM, Videa M, Cruz-Angeles J, Gómez J, *et al.* Effect of basic amino acids on folic acid solubility. Pharmaceutics. 2023;15:2544. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics15112544>
40. Kasten G, Lobo L, Dengale S, Grohgan H, Rades T, *et al.* *In vitro* and *in vivo* comparison between crystalline and co-amorphous salts of naproxen-arginine. European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics. 2018;132:192–199. <https://doi.org/10.1016/j.ejpb.2018.09.024>
41. Лысенко А. А., Жиркова Е. В., Платов Ю. Т., Мартиросян В. В., Черных В. Я., и др. Классификация пшеничной муки по реологическим свойствам с применением альвеографа и методов многомерного анализа. Пищевая промышленность. 2025. № 6. С. 66–70. [Lysenko AA, Zhirkova EV, Platov YuT, Martirosyan VV, Chernykh VYa, *et al.* Classification of wheat flour by rheological properties using an alveograph and multidimensional analysis methods. Food Industry. 2025;(6):66–70. (In Russ.)] <https://doi.org/10.52653/PPI.2025.6.6.014>

Дополнительная информация об авторах / Additional information about the authors

Лобзанова Марина Евгеньевна / Marina E. Lobzanova eLIBRARY SPIN 5924-7450

Сухих Андрей Сергеевич / Andrey S. Sukhikh ORCID 0000-0003-3214-8889; eLIBRARY SPIN 6427-5667

Альтшулер Ольга Генриховна / Olga G. Altshuler ORCID 0000-0001-7035-673X; eLIBRARY SPIN 8700-3836

Иванова Светлана Анатольевна / Svetlana A. Ivanova ORCID 0000-0002-1252-9572; eLIBRARY SPIN 1246-6109

<https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-1-2630>
<https://elibrary.ru/LDULAF>

Оригинальная статья
<https://fptt.ru>

Комплексная характеристика штаммов *Lactobacillus* как перспективных компонентов пробиотических консорциумов



А. С. Фролова^{1,*}, И. С. Милентьева¹, Д. Е. Колпакова¹,
О. А. Неверова¹, В. П. Юстратов¹, А. Н. Петров²

¹ Кемеровский государственный университет, Кемерово, Россия

² Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ), Москва, Россия

Поступила в редакцию: 15.12.2025

Принята после рецензирования: 26.01.2026

Принята к публикации: 03.03.2026

*e-mail: frolova.anna.s@mail.ru

© А. С. Фролова, И. С. Милентьева, Д. Е. Колпакова,
О. А. Неверова, В. П. Юстратов, А. Н. Петров 2026



Аннотация.

Пробиотики – живые микроорганизмы, положительно влияющие на здоровье человека. Наибольшее распространение среди пробиотических культур получили *Lactobacillus*, научный интерес к которым связан с возможностью их участия в профилактике метаболических заболеваний. Цель исследования – оценка потенциала ряда штаммов *Lactobacillus* для дальнейшего использования в качестве пробиотиков, компонентов биологически активных добавок и функциональных продуктов питания, направленных на профилактику метаболических заболеваний.

Объекты исследования – штаммы *Lactobacillus plantarum* (B-5772, B-11264, B-3242), *Lactobacillus fermentum* (B-7574, B-7573), *Lactobacillus acidophilus* (B-194, B-2585, B-2900), *Lactobacillus casei* (B-7951). Для оценки устойчивости штаммов к антибиотикам использовали диско-диффузионный метод, для антагонистической активности – метод диффузии в агаре. Определяли источник углеводов в составе питательной среды для максимального накопления биомассы в единицах оптической плотности. С помощью хроматографического анализа оценивали качественный и количественный состав метаболитов – витаминов группы В, органических кислот и аминокислот. Биосовместимость штаммов определяли путем их совместного культивирования.

Установлено, что штаммы B-194 и B-7951 устойчивы к действию стрептомицина. Промежуточную устойчивость проявляли B-7951 к азитромицину; B-7573 и B-7951 – к гентамицину; B-3242 и B-7573 – к стрептомицину. Высокую антагонистическую активность (более 23 мм) к *Pseudomonas aeruginosa* проявили B-11264 и B-7573; к *Bacillus cereus* – B-7573; к *Enterococcus faecalis* – B-11264, B-3242, B-7951; к *Klebsiella pneumoniae* – B-11264, B-3242 и B-7573. Выявлено, что штаммы лучше накапливали биомассу в присутствии лактулозы. Хроматографический анализ показал, что B-3242 продуцировал витамин В₁ (25,98 ± 0,33 мг/г); B-7573 – витамин В₃ (5,60 ± 0,03 мг/г); B-7573 – лимонную кислоту (52,6 ± 0,7 мг/л); B-2585 – лимонную (58,0 ± 0,8 мг/л) и янтарную (326,5 ± 3,2 мг/л) кислоты; B-7951 – щавелевую (17,1 ± 0,2 мг/л) и винную (17,1 ± 0,2 мг/л) кислоты. Обнаружено, что штамм B-11264 продуцировал триптофан (16,2 ± 0,2 мг/г), глутаминовую кислоту (15,1 ± 0,2 мг/г), глицин (19,1 ± 0,2 мг/г) и пролин (21,8 ± 0,3 мг/г). При совместном культивировании исследуемые штаммы продемонстрировали биосовместимость.

Полученные данные подтвердили перспективность отдельных штаммов *Lactobacillus* для разработки пробиотических композиций и функциональных пищевых продуктов.

Ключевые слова. *Lactobacillus*, пробиотики, антагонистическая активность, антибиотики, метаболиты, биосовместимость штаммов

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания по теме «Разработка биологически активных добавок, состоящих из метаболитов растительных объектов *in vitro*, для защиты населения от преждевременного старения» (проект FZSR-2024-0008) с использованием оборудования ЦКП «Инструментальные методы анализа в области прикладной биотехнологии» на базе КемГУ.

Для цитирования: Фролова А. С., Милентьева И. С., Колпакова Д. Е., Неверова О. А., Юстратов В. П. и др. Комплексная характеристика штаммов *Lactobacillus* как перспективных компонентов пробиотических консорциумов. Техника и технология пищевых производств. 2026. Т. 56. № 1 С. 164–179. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-1-2630>

***Lactobacilli* in Probiotic Consortia: Profile and Prospects**



**Anna S. Frolova^{1,*}, Irina S. Milentyeva¹, Daria E. Kolpakova¹,
Olga A. Neverova¹, Vladimir P. Yustratov¹, Andrey N. Petrov²**

¹ Kemerovo State University, Kemerovo, Russia

² Russian Biotechnological University (ROSBIOTECH), Moscow, Russia

Received: 15.12.2025
Revised: 26.01.2026
Accepted: 03.03.2026

*e-mail: frolova.anna.s@mail.ru
© A.S. Frolova, I.S. Milentyeva, D.E. Kolpakova, O.A. Neverova,
V.P. Yustratov, A.N. Petrov. 2026



Abstract.

Probiotics are live microorganisms that confer documented health benefits upon the host. Among these, *Lactobacilli* remain the most popular probiotic cultures, largely due to their efficacy in preventing metabolic disorders. This article evaluates the probiotic potential of several *Lactobacillus* strains as key functional ingredients in metabolic dietary supplements and functional foods. The research featured *Lactobacillus plantarum* (B-5772, B-11264, B-3242), *Lactobacillus fermentum* (B-7574, B-7573), *Lactobacillus acidophilus* (B-194, B-2585, B-2900), and *Lactobacillus casei* (B-7951). The disc diffusion method revealed the degree of antibiotic resistance while the agar diffusion method made it possible to assess their antagonistic activity. The nutrient media were tested for carbohydrate sources to maximize the biomass accumulation in optical density units. The chromatographic analysis demonstrated the qualitative and quantitative composition of metabolites, i.e., B vitamins, organic acids, and amino acids. The biocompatibility of the strains was determined by co-cultivation.

B-194 and B-7951 were resistant to streptomycin. B-7951 exhibited intermediate resistance to azithromycin while B-7573 and B-7951 were resistant to gentamicin, and B-3242 and B-7573 demonstrated a lack of susceptibility to streptomycin. B-11264 and B-7573 showed high antagonistic activity (≥ 23 mm) against *Pseudomonas aeruginosa*; B-7573 was effective against *Bacillus cereus*; B-11264, B-3242, and B-7951 resisted *Enterococcus faecalis*; B-11264, B-3242 and B-7573 showed good resistance to *Klebsiella pneumoniae*. The strains accumulated biomass better in the presence of lactulose. The chromatographic analysis showed that B-3242 produced vitamin B₁ (25.98 ± 0.33 mg/g); B-7573 generated vitamin B₃ (5.60 ± 0.03 mg/g); B-7573 yielded citric acid (52.6 ± 0.7 mg/L); B-2585 produced citric (58.0 ± 0.8 mg/L) and succinic (326.5 ± 3.2 mg/L) acids; B-7951 generated oxalic (17.1 ± 0.2 mg/L) and tartaric (17.1 ± 0.2 mg/L) acids. B-11264 produced tryptophan (16.2 ± 0.2 mg/g), glutamic acid (15.1 ± 0.2 mg/g), glycine (19.1 ± 0.2 mg/g), and proline (21.8 ± 0.3 mg/g). The strains demonstrated biocompatibility in co-cultivation. The strains involved in this research represent promising candidates for integration into probiotic nutraceuticals and functional food formulations.

Keywords. *Lactobacillus*, probiotics, antagonistic activity, antibiotics, metabolites, biocompatibility of strains

Funding. The research was performed on the premises of the Core Facility for Instrumental Analysis in Applied Biotechnology, Kemerovo State University, as part of State Assignment FZSR-2024-0008: Geroprotective bioactive supplements with plant metabolites *in vitro*.

For citation: Frolova AS, Milentyeva IS, Kolpakova DE, Neverova OA, Yustratov VP, *et al.* *Lactobacilli* in Probiotic Consortia: Profile and Prospects. Food Processing: Techniques and Technology. 2026;56(1):164–179. (In Russ.) <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-1-2630>

Введение

В соответствии с определением Всемирной организации здравоохранения, пробиотики являются живыми микроорганизмами, которые при употреблении в достаточном количестве оказывают благоприятное воздействие на здоровье человека [1]. К числу микроорганизмов с пробиотическим потенциалом относят представителей родов *Lactobacillus*, *Bifidobacterium*, *Propionibacterium*, *Streptococcus*, *Bacillus*, *Enterococcus*, *Saccharomyces* [2, 3]. Среди них *Lactobacillus* зани-

мают лидирующие позиции по частоте применения в качестве компонентов функциональных продуктов питания и биологически активных добавок [4].

Дисбиоз микробиоты желудочно-кишечного тракта (ЖКТ) часто рассматривается как один из ключевых факторов, способствующих развитию ряда хронических заболеваний, включая ожирение, инсулино-резистентность, сердечно-сосудистые заболевания, атеросклероз, нарушение липидного обмена и т. д. [5]. Вследствие этого восстановление и поддержание

состояния микробиоты ЖКТ являются важной задачей здравоохранения: в последние годы заметно усилилось внимание научного сообщества к использованию пробиотических культур для профилактики и коррекции метаболических заболеваний [6].

Бактерии рода *Lactobacillus* обладают рядом биологически значимых характеристик (пробиотической активностью): способностью конкурировать с патогенной и условно-патогенной микрофлорой (проявлять антагонистическую активность), продуцировать органические кислоты, витамины группы В, метаболиты с антиоксидантной активностью и другие биоактивные соединения [7], модулировать иммунитет и поддерживать барьерную функцию кишечника [8, 9]. Эти свойства обосновывают их использование при разработке пробиотических добавок, направленных на коррекцию метаболического статуса, улучшение пищеварения и общего метаболизма [10–12].

Однако высокая эффективность пробиотиков возможна лишь при строгом отборе штаммов с учетом их технологических и биологически значимых свойств. В нормативных документах представлены обязательные критерии, которым должны соответствовать штаммы-пробиотики: устойчивость к влиянию факторов ЖКТ, антагонистическая активность в отношении патогенных и условно-патогенных штаммов, отсутствие вирулентности и токсичности, а также подтвержденная безопасность [13, 14]. Для создания пробиотических консорциумов важно оценивать биосовместимость между штаммами, их способность к совместному культивированию и отсутствие взаимного подавления.

Цель исследования – оценка потенциала ряда штаммов *Lactobacillus* для дальнейшего использования в качестве пробиотиков, компонентов биологически активных добавок и функциональных продуктов питания, направленных на профилактику метаболических заболеваний.

Дополнительно в рамках исследования осуществлялся подбор углеводного состава питательной среды, ориентированный на получение максимального накопления биомассы *Lactobacillus*. Это связано с тем, что рост бактерий существенно зависит от типа доступного углевода [15]. Сахара вызывают значительные различия в скорости роста, уровне накопления биомассы, качественного и количественного продуцирования метаболитов у различных штаммов микроорганизмов, в т. ч. *Lactobacillus* [16]. Некоторые штаммы демонстрируют преимущественное использование глюкозы или фруктозы, тогда как другие лучше растут на лактозе или галактоолигосахаридах [17], что отражает штамм-специфические ферментативные возможности и особенности систем транспорта углеводов. Учет этих различий имеет важное значение при разработке питательных сред и пребиотических добавок, т. к. выбор углеводного субстрата позволяет селективно стимулировать рост полезных штаммов и поддерживать их функциональные свойства.

Объекты и методы исследования

Объектами исследования являлись штаммы микроорганизмов, приобретенные во Всероссийской коллекции промышленных микроорганизмов (ВКПМ) ФГБУ «Государственный научно-исследовательский институт генетики и селекции промышленных микроорганизмов Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» (Москва, Россия). Для их активации лиофилизированную биомассу выдерживали в стерильном физиологическом растворе в течение 30 ± 5 мин с последующим культивированием суспензии микроорганизмов в питательных средах при параметрах, указанных в паспорте ВКПМ. Перечень штаммов и параметры культивирования приведены в таблице 1.

Для активации штаммы микроорганизмов выращивали на питательной среде MRS следующего состава, г/л: панкреатический гидролизат рыбной муки с твином – 21,5 (Диа-М, Россия); экстракт пекарских дрожжей – 5,0 (Диа-М, Россия); пептон – 5,0 (Gelatin Peptone, Испания); глюкоза – 20,0 (Фармстандарт Лексредства, Россия); KH_2PO_4 – 2,0 (Chem-ex, Россия); натрий уксуснокислый – 3,0 (Chem-ex, Россия); аммоний лимоннокислый двузамещенный – 2,0 (Chem-ex, Россия); $\text{MgSO}_4 \times 7\text{H}_2\text{O}$ – 0,1 (Chem-ex, Россия); $\text{MnCl}_2 \times 4\text{H}_2\text{O}$ – 0,05 (Chem-ex, Россия).

Активированные штаммы окрашивали по Граму [18] с использованием комплекта реагентов Микро-ГРАМ-НИЦФ (МиниМед, Россия) и прямого микроскопа Axio-Scope A1 (Carl Zeiss AG, Германия). Оценивали морфологию колоний штаммов, выращенных на агаризованной питательной среде MRS.

В последующих исследованиях культивирование штаммов проводили при температуре 37 ± 2 °C, соответствующей температуре ЖКТ человека [19], для отбора устойчивых к его условиям форм.

Устойчивость к антибиотикам определяли с помощью диско-диффузионного метода [20], который основан на способности антибиотиков угнетать рост микро-

Таблица 1. Штаммы микроорганизмов и температура их культивирования

Table 1. Microbial strains and their cultivation temperature

Штамм	Температура, °C
<i>Lactobacillus plantarum</i> 11p (B-5772)	37
<i>Lactobacillus plantarum</i> B (B-11264)	37
<i>Lactobacillus plantarum</i> 47/7 (B-3242)	28–32
<i>Lactobacillus fermentum</i> 90-TS-4(10) (B-7574)	30
<i>Lactobacillus fermentum</i> 90-TS-4(21) (B-7573)	30
<i>Lactobacillus acidophilus</i> 1к (B-194)	37
<i>Lactobacillus acidophilus</i> 13 (B-2585)	37
<i>Lactobacillus acidophilus</i> 100 АП (B-2900)	38–45
<i>Lactobacillus casei</i> K-25 (B-7951)	37

организмов. Суспензию штаммов суточных культур *Lactobacillus* 3–4 пассажа мутностью 0,5 по Мак-Фарленду (McF) в количестве 100 мкл наносили на поверхность агаризованной среды. Суспензию заданной мутности готовили с помощью денситометра Densichek plus (BioMerieux, Франция). Затем равномерно размещали диски с антибиотиками – азитромицином, 15 мкг (APH); цефалексином (CXN), 30 мкг; гентамицином (HLG), 120 мкг; стрептомицином (HLS), 300 мг; тетрациклином (TET), 30 мкг (Bio-Rad, Франция). В качестве отрицательного контроля использовали диски, пропитанные дистиллированной водой. Чашки помещали в термостат и культивировали 24 ± 1 ч. Интерпретацию полученных результатов проводили при использовании пограничных значений чувствительности *Lactobacillus*. Штаммы классифицировали как устойчивые при диаметре зоны подавления роста в 8–10 мм; промежуточно устойчивые – при диаметре зоны задержки роста 11–20 мм; чувствительные – при формировании зоны задержки роста диаметром более 21 мм.

В исследованиях по антагонистической активности использовали культуральную жидкость суточных культур *Lactobacillus* 3–4 пассажа. Для их выращивания готовили суспензию микроорганизмов мутностью 0,5 McF, помещенных в жидкую среду MRS. В питательную среду помещали 10 % от объема среды суспензии микроорганизмов. Культивирование штаммов проводили в центрифужных пробирках (Eppendorf, Германия). Культивирование в стационарных условиях осуществляли в термостате ТВ-80-1 (ГРПЗ, Россия), при необходимости перемешивания – в шейкере-инкубаторе LSI-3016A (Daihan Labtech, Южная Корея) в течение 24 ± 1 ч, 110 об/мин. Для отделения биомассы от культуральной жидкости использовали центрифугирование, которое осуществляли при 7000 g на центрифуге 5430 (Eppendorf, Германия).

Определение антагонистической активности исследуемых *Lactobacillus* проводили в отношении тест-штаммов *Escherichia coli* B-6645, *Pseudomonas aeruginosa* B-8243, *Bacillus cereus* B-8076, *Enterococcus faecalis* B-8173, *Klebsiella pneumoniae* B-7001 (ВКПМ, Россия) методом диффузии в агар согласно A. Davoodabadi *et al.* [21] и M. Pazhoohan *et al.* [22]. В качестве контроля использовали дистиллированную воду (отрицательный контроль), которую вносили в лунки агара, и диски с антибиотиками (положительный контроль) HLS (300 мг), CXN (30 мкг), HLG (120 мкг), TET (30 мг). Суспензию тест-штаммов в количестве 300 мкл мутностью 0,5 McF наносили на поверхность питательной среды – мясо-пептонного агара следующего состава, г/л: пептон – 10; экстракт мясной – 11 (HiMedia, Индия); NaCl – 5 (ЛенРеактив, Россия); агар бактериологический – 20 (HiMedia, Индия). После равномерного распределения суспензии и ее высыхания в среде делали лунки диаметром 6–8 мм, в которые вносили по 50 мкл культуральной жидкости объектов исследования или дистиллированной воды. В центр чашки

помещали диск с антибиотиком. Чашки выдерживали при комнатной температуре (22 ± 2 °C) в течение 1–2 ч, затем инкубировали 16–18 ч. Антагонистическую активность оценивали по зоне ингибирования: менее 11 мм – отсутствие активности; 11–16 мм – слабая активность; 17–22 мм – средняя активность; более 23 мм – высокая активность [23].

Для подбора углеводного компонента в питательной среде штаммы культивировали на жидкой питательной среде MRS с различным углеводным составом. Глюкозу, входящую в классический состав MRS, заменяли фруктозой, сахарозой и лактулозой (Фармстандарт Лексредства, Россия) в количестве, эквивалентном содержанию глюкозы в питательной среде. Инокулят вносили в объеме 5 % от питательной среды, используя суспензию соответствующих штаммов мутностью 0,5 McF. Культивирование штаммов проводили в стационарных условиях, измеряя оптическую плотность (600 нм) в реальном времени с помощью RTS-8 plus (Biosan, Латвия). Рост микроорганизмов регистрировали до достижения фазы отмирания [24].

Для оценки количественного состава метаболитов штаммы культивировали в стационарных условиях. В качестве отрицательного контроля выступала питательная среда MRS. Эксперименты выполняли при единой температуре, что позволило выявить штаммы, способные функционировать в организме человека. Образцы отбирали в трех точках роста: экспоненциальной, стационарной и фазе отмирания. Время наступления каждой фазы определяли на основе S-образной кривой роста. Содержание витаминов (B_1 , B_2 , B_3 , B_5 , B_6 , B_{12}), аминокислот и органических кислот определяли методом высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ) на хроматографе Shimadzu LC-20 Prominence (Shimadzu Corporation, Япония) с диодно-матричным детектором Shimadzu SPD20MA, колонкой Phenomenex Gemini 5 мкм C-18 250×4,6 мм. Определение водорастворимых витаминов проводили по ГОСТ Р 55482-2013, органических кислот – по ГОСТ 33410-2015.

Анализ органических кислот осуществляли методом ВЭЖХ. Для пробоподготовки 500 мг культуральной жидкости переносили в колбу с 20 мл дистиллированной воды, перемешивали на шейкере-инкубаторе при 900 об/мин в течение 1 ч, подвергали ультразвуковой обработке в УЗ-бане Ферропласт (ВУ-09-Я-ФП-04, Россия) в течение 15 мин. Затем пробу центрифугировали, отбирали 1 мл супернатанта для ВЭЖХ. В качестве подвижной фазы использовали раствор KH_2PO_4 (0,02 моль/л).

Следует отметить, что в рамках данного исследования определялись органические кислоты, отличные от основных продуктов гомо- и гетероферментативного брожения. Молочная, уксусная и муравьиная кислоты не анализировались, поскольку их продукция молочнокислыми бактериями является доминирующей и достаточно охарактеризованной, тогда как цель работы – выявить различия в синтезе менее типичных

органических кислот, формирующих штамм-специфический метаболический профиль. Оценивалось содержание щавелевой, винной, малеиновой, лимонной и янтарной кислот.

Определение витаминов группы В осуществлялось методом обращенно-фазовой ВЭЖХ (ГОСТ 55482-2013) [25].

Пробоподготовка для оценки содержания витаминов В₁ и В₂. К навеске образца (2,5 г) добавляли 20 мл HCl молярной концентрацией 0,1 моль/л, нагревали на водяной бане WB-4 (Stegler, Китай) при температуре 100 °С в течение 30 мин, затем охлаждали до комнатной температуры (22 ± 2 °С). Доводили pH 4,5 ± 0,1 с помощью 20 % раствора Na₂CO₃ (ЛенРеактив, Россия). Затем добавляли 0,05 г ферментного препарата α-амилазы из *Aspergillus oryzae* и выдерживали 16 ч. Для осаждения белков к гидролизату добавляли 1,5 мл 20 % раствора трихлоруксусной кислоты (ТХУ) (Диа-М, Россия). Затем нагревали на водяной бане при температуре 100 °С в течение 15 мин, центрифугировали 5 мин с центробежным ускорением 7000 g. Полученный супернатант фильтровали.

Пробоподготовка для оценки содержания витамина В₃. К навеске образца (2,5 г) добавляли 20 мл HCl молярной концентрацией 0,1 моль/л, нагревали на водяной бане при температуре 100 °С в течение 90 мин, затем охлаждали. Доводили значение pH 10,5 ± 0,5 раствором 10 моль/л NaOH (ЛенРеактив, Россия). Для осаждения белков добавляли 1 мл 25 % раствора ацетата цинка (Chem-ex, Россия). Центрифугировали 5 мин с центробежным ускорением 7000 g и фильтровали.

Пробоподготовка для оценки содержания витамина В₅. К навеске образца (2,5 г) добавляли 20 мл дистиллированной воды. Доводили pH 4,5 ± 0,1 ортофосфорной кислотой (ЛенРеактив, Россия). Добавляли 0,05 г α-амилазы из *A. oryzae*, выдерживали 16 ч. Для осаждения белков к гидролизату добавляли 1,5 мл 20 % раствора ТХУ, центрифугировали 5 мин с центробежным ускорением 7000 g и фильтровали.

Пробоподготовка для оценки содержания витаминов В₆ и В₁₂. К навеске образца (5,0 г) добавляли 20 мл 5 % раствора ТХУ, нагревали на водяной бане при температуре 100 °С в течение 30 мин, затем охлаждали. Доводили pH 4,5 ± 0,1 с помощью 20 % раствора Na₂CO₃. Добавляли 0,05 г α-амилазы из *A. oryzae* и выдерживали 16 ч. Центрифугировали 5 мин с центробежным ускорением 7000 g и фильтровали.

В качестве подвижной фазы использовали KН₂РO₄ молярной концентрации 0,02 моль/л.

Определение аминокислот осуществляли методом обращенно-фазовой ВЭЖХ с получением фенилтиогидантоинов аминокислот. Хроматографический анализ проводили в градиентном режиме, скорость расхода элюента составляла 1 мл/мин, температура колонки – 40 °С. В качестве подвижной фазы использовали буфер дигидрофосфата калия pH 5,5 (компонент А) и 1 % раствор изопропанола (Диа-М, Россия) в ацетонитриле

(ЭКОС-1, Россия) (компонент В). Градуировочную зависимость строили по стандартным растворам аминокислот (Sigma, Германия) [26].

Пробоподготовка объектов исследования. 1 мл анализируемого образца смешивали с 8 мл 6 М HCl. Гидролиз осуществляли при температуре 110 °С в течение 36 ч. После охлаждения до комнатной температуры (22 ± 2 °С) гидролизат фильтровали, 1 мл фильтрата высушивали в потоке воздуха при 65 °С до образования сухого остатка. К высушенной пробе добавляли NaOH (0,15 М) до pH 7,5–8,0 раствора, добавляли 0,7 мл раствора фенилизотионата (Acros Organics B.V.B.A., США) в изопропанол (0,4 мл фенилизотионата доводят изопропанолом до 25 мл), перемешивали и добавляли 0,1 мл дистиллированной воды. Раствор выдерживали в течение 20 мин при комнатной температуре (22 ± 2 °С), затем высушивали в потоке воздуха при 60 °С 10–15 мин. Сухой остаток растворяли в 2 мл дистиллированной воды и фильтровали.

Биосовместимость штаммов по отношению друг к другу оценивали с использованием авторской модификации метода диффузии в агар. Для этого предварительно получали культуральную жидкость суточных культур *Lactobacillus* 3–4 пассажа. На поверхность плотной питательной среды MRS равномерно наносили 300 мкл суспензии мутностью 0,5 McF суточных культур *Lactobacillus* 3–4 пассажа. После равномерного распределения суспензии и ее высыхания в среде делали лунки диаметром 6–8 мм, в которые вносили по 50 мкл культуральной жидкости исследуемых штаммов. Чашки выдерживали при комнатной температуре (22 ± 2 °С) в течение 1–2 ч, затем инкубировали 16–18 ч. Биосовместимость штаммов оценивали по зоне угнетения роста: выше 10 мм – подавление роста (обозначали знаком «–»); менее 10 мм без признаков стимуляции роста – биосовместимы (обозначали знаком «+»); менее 10 мм с признаками стимуляции роста – стимуляция роста (обозначали знаком «++»).

Работу выполняли в стерильных условиях ламинарного бокса класса 2 типа А БАВп-01-«Ламинар-С»-1,5 (Ламинарные системы, Россия). Стерилизацию лабораторной посуды проводили с помощью сухожарового шкафа ШС-80-02 СПУ (Смоленское СКТБ СПУ, Россия), стерилизацию питательных сред и утилизацию отходов – с помощью стерилизаторов паровых вертикальных автоматических СПВА-75-1-НН (Транс-Сигнал, Россия).

Исследования проводили в трехкратной повторности. Результаты представлены в виде среднего значения (X) и ошибки средней величины (SE).

Результаты и их обсуждение

Поскольку штаммы приобретены во Всероссийской коллекции промышленных микроорганизмов (ВКПМ), они уже идентифицированы и безопасны, поэтому молекулярно-генетическое подтверждение таксономического статуса не требовалось. После активации штаммов посторонние микроорганизмы не обнаружены.

По результатам окрашивания все штаммы относились к грамположительным бактериям, что соответствует данным *Lactobacillus*. Результаты микроскопирования штаммов В-11264 и В-2585 приведены в ранее опубликованной статье [27].

Морфометрические характеристики колоний соответствовали типичным размерам данного вида. На питательной среде формировались круглые, с гладким краем, выпуклым профилем, белые, глянцевые колонии диаметром 1–2 мм.

Результаты оценки устойчивости штаммов *Lactobacillus* к ряду антибиотиков представлены в таблице 2.

Обнаружено, что устойчивость исследованных штаммов *Lactobacillus* к различным антибиотикам варьируется в зависимости от вида. Устойчивость к антибиотикам штаммов В-11264 и В-2585 приведена в предыдущей работе авторов [27].

Промежуточную устойчивость к азитромицину (АРН) проявлял штамм В-7951 ($14,4 \pm 0,3$ мм), тогда как остальные культуры продемонстрировали чувствительность (диаметр зон задержки роста превышал 21 мм). По данным литературных источников, механизм антибактериального действия азитромицина, как и других макролидов, заключается в связывании с 50S субъединицей рибосомы, что блокирует выход полипептидной цепи и ингибирует синтез белка, приводя к остановке роста чувствительных бактерий. Данные согласуются с наблюдениями N. Darbandi *et al.* [28], которые установили, что воздействие азитромицина вызывало значительные изменения состава кишечной микробиоты, включая подавление роста чувствительных видов, таких как *Lactobacillus acidophilus*.

Промежуточную устойчивость к цефалексину (СХН) проявлял штамм В-2585 ($17,2 \pm 1,1$ мм). Штаммы В-11264, В-3242, В-7573, В-194, В-2900 и В-7951 проявляли чувствительность к антибиотику. Эти данные соответствовали предыдущим исследованиям, согласно которым устойчивость *Lactobacillus* к β -лактамам антибиотикам может быть врожденной или приобретенной и сильно различается между штаммами [29].

По отношению к гентамицину (HLG) устойчивость выявлена только у штамма В-7951 ($11,3 \pm 2,5$ мм), остальные штаммы были чувствительны к данному антибиотику. Штаммы *Lactobacillus* могут обладать врожденной устойчивостью к аминогликозидам (включая гентамицин), не связанной с переносимыми генами резистентности и, следовательно, не представляющей угрозы горизонтального переноса устойчивости другим бактериям. Предположительно, устойчивость к аминогликозидам в таких случаях обусловлена преимущественно особенностями клеточной стенки и механизмами ограничения проникновения антибиотика внутрь клетки, а не наличием экспрессируемых генов резистентности [30].

В случае стрептомицина (HLS) устойчивость наблюдалась у штаммов В-3242 ($15,1 \pm 1,0$ мм), В-7573 ($13,8 \pm 0,3$ мм), В-194 ($8,9 \pm 0,4$ мм) и В-7951 ($10,2 \pm 0,6$ мм). Различия в чувствительности к аминогликозидам и стрептомицину связаны с наличием генов, кодирующих ферменты инактивации антибиотика [31]. Однако в ходе данного исследования не ставилась задача изучить наличие или отсутствие генов антибиотикорезистентности с помощью молекулярно-генетических методов, что является ограничением данной работы и будет устранено в ходе дальнейших исследований.

К тетрациклину (TET) промежуточную устойчивость проявили штаммы В-11264 ($20,3 \pm 1,5$ мм), В-2585 ($18,5 \pm 4,1$ мм) и В-7951 ($20,9 \pm 4,0$ мм), тогда как остальные штаммы оказались чувствительными. Результаты указали на возможное присутствие у отдельных штаммов генов *tet*, обеспечивающих рибосомную защиту [32].

Штаммы В-5772 и В-7574 не росли в ходе эксперимента на питательной среде. Предположительно, культивирование при 37 °С не подходило для В-7574, у которого, по данным ВКПМ, температура роста – 30 °С. Возможные причины отсутствия роста В-5772 не выявлены.

Результаты наличия антагонистической активности *Lactobacillus* по отношению к тест-штаммам патогенных и условно-патогенных микроорганизмов представлены в таблице 3.

Таблица 2. Влияние ряда антибиотиков на рост штаммов *Lactobacillus* (диско-диффузионный метод)

Table 2. Effect of antibiotics on *Lactobacillus* strains: Disc diffusion method

Образец	Диаметр зоны подавления роста, мм					
	Азитромицин, 15 мкг	Цефалексин, 30 мкг	Гентамицин, 120 мкг	Стрептомицин, 300 мг	Тетрациклин, 30 мг	Вода
В-5772	–	–	–	–	–	0,0 ± 0,0
В-3242	38,7 ± 5,0	65,0 ± 5,0	43,6 ± 2,1	15,1 ± 1,0	23,4 ± 1,5	0,0 ± 0,0
В-7574	–	–	–	–	–	0,0 ± 0,0
В-7573	22,0 ± 2,0	31,3 ± 1,1	17,6 ± 1,5	13,8 ± 0,3	26,4 ± 0,5	0,0 ± 0,0
В-194	30,5 ± 0,5	33,1 ± 1,0	25,3 ± 3,5	8,9 ± 0,4	25,3 ± 4,5	0,0 ± 0,0
В-2900	33,1 ± 1,0	27,7 ± 6,5	32,4 ± 1,5	45,4 ± 05	43,4 ± 0,5	0,0 ± 0,0
В-7951	14,4 ± 0,3	25,4 ± 0,6	11,3 ± 2,5	10,2 ± 0,6	20,9 ± 4,0	0,0 ± 0,0

Примечание: «–» – штаммы не выросли в ходе эксперимента.

Note: “–” – the strains did not grow during the experiment.

Анализ антагонистической активности *Lactobacillus* показал, что выраженность ингибирующего действия носит штамм-специфический характер и зависит не только от вида тест-микроорганизма, но и от его физиологических и структурных особенностей.

По отношению к *Escherichia coli* слабую антагонистическую активность продемонстрировали В-11264 и В-7573, тогда как у остальных исследуемых штаммов ингибирующее действие отсутствовало. Полученные данные указывают на ограниченную чувствительность *E. coli* к антимикробным метаболитам отдельных штаммов *Lactobacillus* в условиях данного эксперимента, что согласуется с литературными данными. N. Soltani et al. установили, что штаммы *Lactobacillus acidophilus* и *Lactobacillus casei* проявляли антибактериальную активность против *E. coli* (диаметр зоны ингибирования от 15 до 19 мм) [33]. F. Tigu et al. выявили, что изоляты *Lactobacillus* замедлили рост *E. coli* с зонами ингибирования от 10 до 14 мм [34]. Различия между полученными и литературными данными могут быть обусловлены как штамм-специфичностью продуцируемых антимикробных факторов, так и различиями в экспериментальных условиях.

Против *Pseudomonas aeruginosa* выраженную антагонистическую активность проявили штаммы В-11264 и В-7573, тогда как штамм В-2585 характеризовался слабым ингибирующим эффектом. Более высокая чувствительность *P. aeruginosa* по сравнению с *E. coli*, выявленная для ряда штаммов, может быть связана с различиями в устойчивости данных микроорганизмов к органическим кислотам, перекиси водорода и другим метаболитам *Lactobacillus*, что подтверждает

штамм-специфический характер взаимодействия. Аналогичные выводы были сделаны J. Li et al., которые установили, что антибактериальная активность молочнокислых бактерий в отношении *P. aeruginosa* носит строго индивидуальный характер и определяется свойствами конкретных штаммов [35].

По отношению к *Bacillus cereus* антагонистическую активность продемонстрировал штамм В-7573. Избирательность действия в этом случае может указывать на способность данного штамма к синтезу специфических антимикробных соединений, активных в отношении спорообразующих бактерий, что согласуется с данными M.U.E. Sanam et al. [36]. Они определили, что *Lactobacillus* spp. способны ингибировать рост *B. cereus* со средней зоной подавления 20,5 мм.

По отношению к *Enterococcus faecalis* высокая антагонистическая активность отмечена практически у всех исследуемых штаммов, кроме В-194 и В-2900. Этот результат свидетельствует о высокой чувствительности *E. faecalis* к метаболитам *Lactobacillus*, однако отсутствие ингибирующего эффекта у отдельных штаммов подтверждает, что данный признак не является универсальным для всех представителей рода *Lactobacillus*. S. Ravi et al. обнаружили, что *Lactobacillus rhamnosus* подавляли рост *E. faecalis* с зоной ингибирования 11–12 мм [37].

Против *Klebsiella pneumoniae* выраженную антагонистическую активность продемонстрировали штаммы В-11264, В-3242 и В-7573, тогда как штамм В-2585 проявил слабый ингибирующий эффект. Отсутствие антагонизма к *E. coli* при наличии ингибирующего действия на *K. pneumoniae* подчеркивает, что чувствительность

Таблица 3. Антагонистическая активность по отношению к тест-штаммам патогенных и условно-патогенных микроорганизмов (метод диффузии в агар)

Table 3. Antagonistic activity against pathogenic and conditionally pathogenic test strains: Agar diffusion

Образец	Диаметр зоны подавления роста, мм				
	<i>Escherichia coli</i>	<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	<i>Bacillus cereus</i>	<i>Enterococcus faecalis</i>	<i>Klebsiella pneumoniae</i>
В-5772	—	—	—	—	—
В-11264	14,60 ± 0,36	33,57 ± 0,55	0,00 ± 0,00	25,45 ± 0,41	28,60 ± 0,46
В-3242	0,00 ± 0,00	13,40 ± 0,17	0,00 ± 0,00	26,31 ± 0,43	32,16 ± 0,52
В-7574	—	—	—	—	—
В-7573	18,32 ± 1,75	23,21 ± 0,38	23,60 ± 0,36	20,30 ± 0,33	29,12 ± 0,47
В-194	10,17 ± 0,25	10,12 ± 0,54	0,00 ± 0,00	0,00 ± 0,00	0,00 ± 0,00
В-2585	0,00 ± 0,00	12,86 ± 0,21	0,00 ± 0,00	21,15 ± 0,34	17,42 ± 0,28
В-2900	0,00 ± 0,00	0,00 ± 0,00	0,00 ± 0,00	0,00 ± 0,00	0,00 ± 0,00
В-7951	0,00 ± 0,00	19,34 ± 0,31	0,00 ± 0,00	25,38 ± 0,41	10,23 ± 0,16
Стрептомицин, 300 мг	12,00 ± 1,32				
Цефалексин, 30 мкг			23,5 ± 0,38		27,6 ± 0,45
Гентамицин, 120 мкг		20,53 ± 0,33			
Тетрациклин, 30 мг				25,5 ± 0,42	
Вода	0,00 ± 0,00	0,00 ± 0,00	0,00 ± 0,00	0,00 ± 0,00	0,00 ± 0,00

Примечание: «—» – штаммы не выросли в ходе эксперимента.

Note: “—” – the strains did not grow during the experiment.

грамотрицательных бактерий не определяется исключительно их принадлежностью к бактериям группы кишечной палочки, а зависит от особенностей клеточной оболочки и механизмов устойчивости конкретного вида. Похожие результаты были получены в работе М. Fateh *et al.*, в которой установлено, что *L. casei* демонстрировал антимикробную активность против *K. pneumoniae* с зоной задержки роста 20,3 мм [38].

Штамм В-194 проявил низкую активность в отношении условно-патогенных микроорганизмов, штамм В-2900 не продемонстрировал антагонистической активности. Отсутствие антагонистической активности у штамма В-2900 в условиях данного эксперимента может быть связано с методическими особенностями исследования, поскольку синтез антимикробных метаболитов у *Lactobacillus* может зависеть от условий куль-

тивирования, фазы роста и используемого метода оценки. В литературе описаны случаи, когда антагонистическая активность выявлялась при использовании альтернативных подходов, что указывает на возможную метод-зависимую вариабельность проявления эффекта.

Штаммы В-5772 и В-7574 не росли в условиях эксперимента и, в связи с невозможностью корректной оценки их антагонистических свойств, были исключены из дальнейших исследований.

Результаты изменения оптической плотности в зависимости от источника углевода (глюкоза, сахароза, фруктоза, лактулоза) представлены на рисунке 1.

Исследуемые штаммы характеризовались S-образной кривой роста. Во всех культурах максимальные значения оптической плотности, отражающие повышение мутности среды и увеличение концентрации

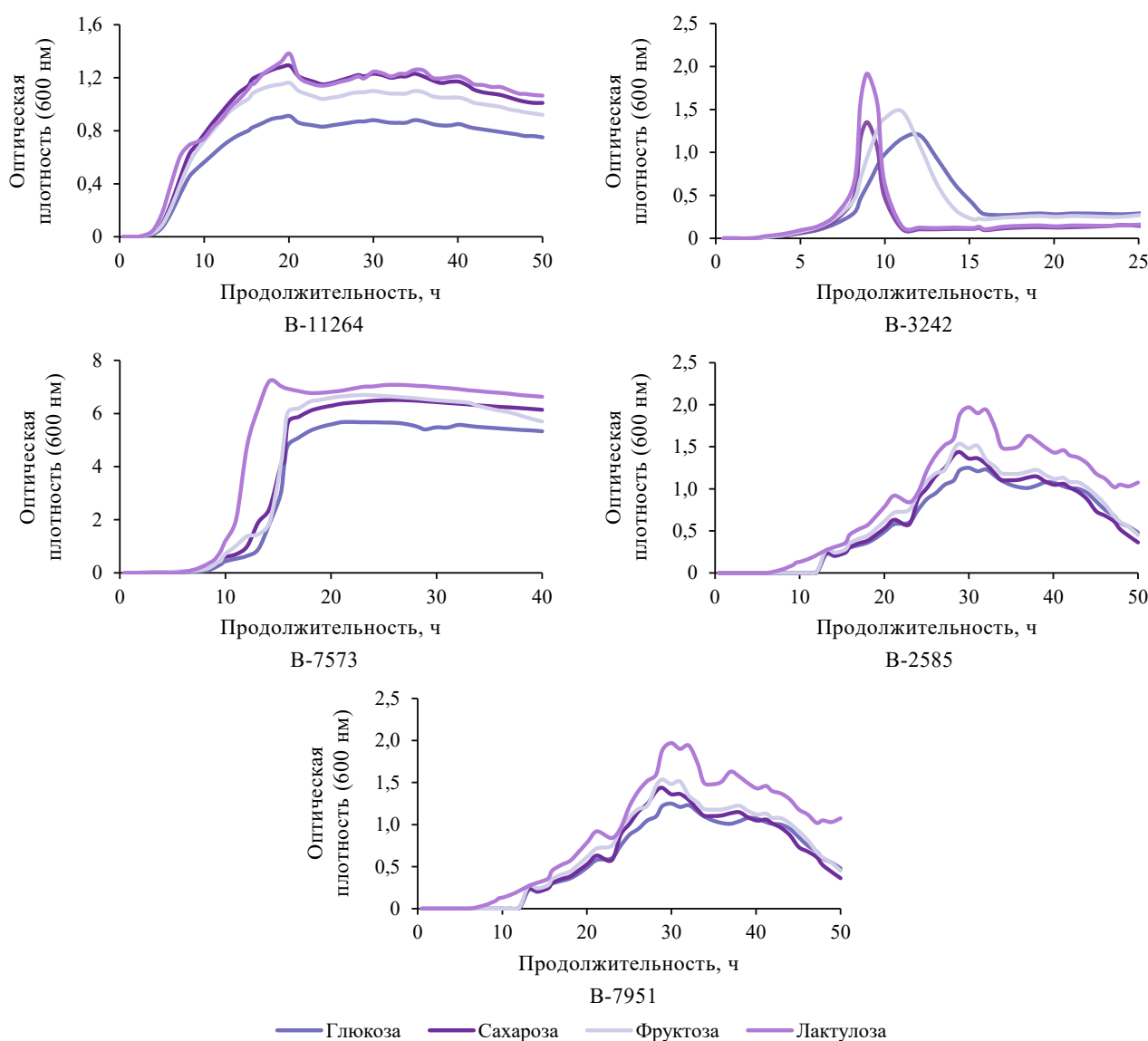


Рисунок 1. Кривые роста штаммов *Lactobacillus* на среде MRS с различным углеводным составом

Figure 1. *Lactobacillus* strains on MRS media with different carbohydrate composition: Growth curves

клеток, регистрировали при использовании лактулозы в качестве источника углевода. Сахароза и фруктоза обеспечивали средние показатели роста, тогда как глюкоза характеризовалась наименьшими значениями оптической плотности. Исходя из полученных данных, для дальнейших исследований качественного и количественного состава продуцируемых метаболитов штаммы культивировали на среде MRS с лактулозой как углеводом, обеспечивающим наибольшие значения оптической плотности культур.

Имея S-образную кривую роста штаммов на среде MRS с лактулозой, определены три временные точки: первая – экспоненциальная фаза роста, вторая – максимального накопления биомассы, третья – фаза отмирания. Данные точки использовались в качестве времени, в которое осуществлялось определение состава микробных метаболитов. Выбранные временные точки представлены в таблице 4.

Результаты по оценке состава витаминов группы В, продуцируемых штаммами, представлены в таблице 5.

Анализ количественного содержания витаминов группы В показал, что ни один из исследуемых штам-

мов не продуцировал витамин В₂. Литературные данные свидетельствуют о том, что представители рода *Lactobacillus* способны синтезировать рибофлавин (витамин В₂) за счет функционирования *rib*-оперона, однако у большинства штаммов его продукция ограничена собственными метаболическими потребностями. Отсутствие или неполнота генов *ribA*, *ribB*, *ribG* и *ribH* делает синтез рибофлавина невозможным, что согласуется с полученными результатами [39].

Среди исследуемых образцов наиболее значимое накопление витамина В₁ зафиксировано у штамма В-3242: в первой временной точке он достигал $25,98 \pm 0,33$ мг/г, а среднее значение по трем точкам составило $25,03$ мг/г, что существенно превышало показатели остальных штаммов. Для витамина В₃ максимальные концентрации обнаружены у штамма В-7573, который во второй точке до $5,60 \pm 0,03$ мг/г, превосходя значения других исследуемых образцов.

Следует отметить наличие выраженных колебаний концентраций витаминов в отдельных временных точках культивирования. Так, для штаммов В-11264 и В-7573 наблюдался резкий рост содержания витами-

Таблица 4. Временные точки отбора проб для анализа метаболитов

Table 4. Sampling for metabolite analysis: Time points

Образец	Точка 1	Точка 2	Точка 3
В-11264	$14,5 \pm 1,0$ ч	$35,0 \pm 2,0$ ч	$48,0 \pm 2,0$ ч
В-3242	$6,0 \pm 1,0$ ч	$9,0 \pm 2,0$ ч	$11,0 \pm 2,0$ ч
В-7573	$10,0 \pm 1,0$ ч	$26,0 \pm 2,0$ ч	$35,0 \pm 2,0$ ч
В-2585	$28,0 \pm 2,0$ ч	$38,0 \pm 2,0$ ч	$44,0 \pm 2,0$ ч
В-7951	$10,0 \pm 1,0$ ч	$14,5 \pm 1,0$ ч	$17,0 \pm 1,0$ ч

Таблица 5. Качественное и количественное содержание состава витаминов группы В в исследуемых образцах

Table 5. Qualitative and quantitative content of B vitamins across samples

Образец	Временные точки	Содержание витаминов, мг/г					
		В ₁	В ₂	В ₃	В ₅	В ₆	В ₁₂
В-11264	Точка 1	$2,88 \pm 0,04$	н/о	$1,38 \pm 0,02$	0	$0,02 \pm 0,01$	$0,01 \pm 0,01$
	Точка 2	$1,23 \pm 0,02$	н/о	$1,65 \pm 0,02$	0	н/о	$0,02 \pm 0,01$
	Точка 3	$2,83 \pm 0,02$	н/о	$0,95 \pm 0,01$	$0,04 \pm 0,01$	н/о	$0,01 \pm 0,01$
В-3242	Точка 1	$25,98 \pm 0,33$	н/о	$1,70 \pm 0,02$	$0,06 \pm 0,01$	$0,02 \pm 0,01$	$0,01 \pm 0,01$
	Точка 2	$25,50 \pm 0,33$	н/о	$1,25 \pm 0,02$	$0,04 \pm 0,01$	$0,01 \pm 0,01$	$0,03 \pm 0,01$
	Точка 3	$23,60 \pm 0,31$	н/о	$0,74 \pm 0,01$	$0,03 \pm 0,01$	$0,02 \pm 0,01$	$0,02 \pm 0,01$
В-7573	Точка 1	$2,11 \pm 0,03$	н/о	$0,26 \pm 0,01$	н/о	н/о	н/о
	Точка 2	$14,00 \pm 0,18$	н/о	$5,60 \pm 0,03$	$0,05 \pm 0,01$	$0,01 \pm 0,01$	$0,07 \pm 0,01$
	Точка 3	$1,55 \pm 0,02$	н/о	$0,83 \pm 0,01$	$0,04 \pm 0,01$	$0,02 \pm 0,01$	$0,05 \pm 0,01$
В-2585	Точка 1	$1,16 \pm 0,02$	н/о	$1,88 \pm 0,02$	$0,02 \pm 0,01$	$0,03 \pm 0,01$	$0,01 \pm 0,01$
	Точка 2	$2,15 \pm 0,03$	н/о	$1,46 \pm 0,02$	$0,04 \pm 0,01$	$0,01 \pm 0,01$	$0,01 \pm 0,01$
	Точка 3	$3,13 \pm 0,04$	н/о	$1,43 \pm 0,02$	$0,04 \pm 0,01$	$0,01 \pm 0,01$	$0,01 \pm 0,01$
В-7951	Точка 1	$18,87 \pm 0,25$	н/о	$0,76 \pm 0,01$	$0,03 \pm 0,01$	$0,02 \pm 0,01$	$0,06 \pm 0,01$
	Точка 2	$1,69 \pm 0,02$	н/о	$0,88 \pm 0,01$	$0,02 \pm 0,01$	$0,03 \pm 0,01$	$0,02 \pm 0,01$
	Точка 3	$1,58 \pm 0,02$	н/о	$1,06 \pm 0,02$	н/о	$0,02 \pm 0,01$	н/о
Среда MRS		н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о

Примечание: н/о – вещество не обнаружено; 0 – вещество обнаружено, но в количестве, ниже минимального порога диапазона измерений.

Note: н/о – no substance detected; 0 – The substance was present in concentrations below the limit of quantification.

нов B_1 и B_3 соответственно во второй временной точке, тогда как для штамма В-7951 максимальные значения витамина B_1 фиксировались в первой временной точке. Подобные скачкообразные изменения могут быть обусловлены фазоспецифичностью вторичного метаболизма, а также перераспределением внутриклеточных ресурсов между ростом и синтезом метаболитов [40].

Продукция витаминов и других метаболитов у молочнокислых бактерий не всегда коррелирует линейно с кривой роста. На разных этапах культивирования происходит переключение метаболических путей и изменения в профиле экспрессии генов, что особенно заметно в переходе от экспоненциальной фазы к стационарной, когда снижается скорость деления клеток и перераспределяются ресурсы на синтез вторичных метаболитов. Например, у *L. rhamnosus* переход между фазами роста сопровождается значительными изменениями в экспрессии множества генов и белков, влияющих на метаболизм, что отражает фазоспецифичность метаболических процессов у *Lactobacillus* [41].

Производство витаминов B_5 , B_6 и B_{12} во всех штаммах оставалось на уровне ниже 0,1 мг/г. Вместе с тем штаммы В-11264, В-2585 и В-7951 стабильно продуцировали следовые количества витаминов B_5 и B_{12} во всех временных точках, что указывает на сохранение соответствующих метаболических путей, несмотря на низкую интенсивность их реализации.

Анализ динамики накопления витаминов показал отсутствие универсальной временной точки, оптимальной для всех штаммов. Для штамма В-3242 наибольшее содержание витамина B_1 отмечено в точке 1, тогда как штамм В-7573 достигал максимума витамина B_3 в точке 2. Штамм В-2585 демонстрировал постепенное увеличение концентрации витаминов B_1 и B_3 от точки 1 к точке 3. Таким образом, штаммы

В-3242 и В-7573 характеризовались наибольшей способностью к синтезу витаминов B_1 и B_3 соответственно среди исследуемых культур, что свидетельствует о различиях в метаболической направленности штаммов.

Полученные данные не противоречили результатам исследования N.Y. Khromova *et al.*, которые установили, что *Lactobacillus* синтезируют витамины группы В [42]. *L. casei* вырабатывал витамины B_1 (19,54 мг/л) и B_6 (11,40 мг/л); *L. rhamnosus* – B_1 (14,72 мг/л), B_5 (27,69 мг/л) и B_6 (2,10 мг/л); *L. acidophilus* – B_5 (43,64–43,03 мг/л) и B_6 (1,10–4,10 мг/л); *Lactobacillus plantarum* – B_5 (46,65 мг/л) и B_6 (3,45 мг/л); *Lactobacillus salivarius* – B_5 (138,60 мг/л) и B_6 (1,50 мг/л); *Lactobacillus sakei* – B_5 (5,11 мг/л) и B_6 (6,82 мг/л).

Отбор временных точек для анализа органических кислот был ограничен первой и третьей точками культивирования, соответствующими экспоненциальной фазе роста и фазе отмирания, ввиду отсутствия выраженной временной зависимости содержания витаминов группы В.

Результаты по оценке качественного и количественного состава органических кислот, продуцируемых штаммами, представлены в таблице 6.

Анализ количественного содержания органических кислот показал, что исследуемые образцы существенно различаются по спектру и интенсивности синтеза органических кислот. Наиболее выраженные различия касались лимонной и янтарной кислот. Штамм В-7573 в первой точке культивирования продуцировал максимальное количество лимонной кислоты среди всех образцов, что было в 5,3 раза больше, чем у штамма В-3242 в аналогичной точке. Однако в третьей точке уровень лимонной кислоты у В-7573 был в 1,7 раза ниже, чем у штамма В-2585, который продемонстрировал максимальное накопление данного метаболита. В-2585 характеризовался наиболее интен-

Таблица 6. Качественное и количественное содержание органических кислот в исследуемых образцах

Table 6. Qualitative and quantitative content of organic acids across samples

Образец	Временные точки	Содержание органических кислот, мг/л				
		Щавелевая кислота	Винная кислота	Малеиновая кислота	Лимонная кислота	Янтарная кислота
В-11264	Точка 1	0	1,0 ± 0,1	0	21,6 ± 0,3	0
	Точка 3	0	2,0 ± 0,1	0	0	0
В-3242	Точка 1	0	6,9 ± 0,1	1,0 ± 0,1	9,9 ± 0,1	42,7 ± 0,6
	Точка 3	0	5,3 ± 0,1	1,2 ± 0,1	27,3 ± 0,4	31,4 ± 0,4
В-7573	Точка 1	н/о	12,5 ± 0,2	0,6 ± 0,1	52,6 ± 0,7	12,7 ± 0,2
	Точка 3	0	4,6 ± 0,1	1,1 ± 0,1	33,5 ± 0,4	28,4 ± 0,4
В-2585	Точка 1	0	3,5 ± 0,1	0	0	326,5 ± 3,2
	Точка 3	н/о	12,1 ± 0,2	0,8 ± 0,1	58,0 ± 0,8	60,3 ± 0,8
В-7951	Точка 1	17,1 ± 0,2	0	0	26,9 ± 0,4	0,4 ± 0,1
	Точка 3	0	17,1 ± 0,2	0	0	11,1 ± 0,1
Среда MRS		н/о	н/о	н/о	н/о	н/о

Примечание: н/о – вещество не обнаружено; 0 – вещество обнаружено, но в количестве, ниже минимального порога диапазона измерений.

Note: н/о – no substance detected; 0 – The substance was present in concentrations below the limit of quantification.

сивным образованием янтарной кислоты в первой точке, причем ее содержание превышало уровень штамма В-3242 в 7,6 раза. В третьей временной точке штамм сохранял высокий уровень метаболической активности, что проявлялось в одновременном накоплении янтарной, лимонной и винной кислот. Штамм В-3242 отличался сравнительно сбалансированным профилем органических кислот: изменения концентраций по временным точкам свидетельствовали о стабильном, умеренном уровне синтеза без резких скачков, характерных для других штаммов. В-7951 выделялся среди остальных продуцированием щавелевой кислоты, которая не определялась у других образцов. Кроме того, содержание винной кислоты в третьей точке у В-7951 превышало аналогичные показатели штаммов В-3242 и В-7573 соответственно в 3,2 и 3,7 раза.

Таким образом, полученные в ходе исследования данные подтверждают, что профиль органических кислот у *Lactobacillus* определяется преимущественно штамм-специфическими особенностями метаболизма, а не принадлежностью к виду или фазе роста. Способность представителей рода *Lactobacillus* формировать разнообразный спектр органических кислот показана в ряде исследований, причем выраженность синтеза отдельных метаболитов существенно варьируется между штаммами. Так, D. Szczerbiec *et al.* продемонстрировали, что уровни молочной, лимонной и янтарной кислот значительно различаются даже между близкородственными штаммами, что подчеркивает индивидуальный характер метаболических профилей. Максимальные уровни молочной и лимонной кислот зарегистрированы у *Lactobacillus crispatus* – 25,09 и 14,12 мМ соответственно. *Lactobacillus jensenii* синтезировал янтарную кислоту (52,11 мМ) [43]. Аналогичные данные продемонстрированы в исследовании J. Wang *et al.* [44], в которой показано, что *L. acidophilus* активно продуцирует пропионовую (0,33 мМ), валириановую (0,32 мМ) и капроновую (2,32 мМ) кислоты, формируя специфический профиль короткоцепочечных жирных кислот.

Сопоставление данных первой и третьей временных точек показало отсутствие универсальной тенденции изменения содержания органических кислот во времени, что свидетельствует о штамм-специфическом характере метаболической активности. Третья временная точка, соответствующая фазе отмирания культуры, была выбрана для дальнейшего анализа, поскольку к этому моменту штаммы проходят все основные стадии роста и адаптации к условиям культивирования. К данному этапу формируется метаболический профиль, отражающий суммарную метаболическую активность штамма на протяжении всего цикла роста, что обеспечивает более корректное и сопоставимое сравнение между исследуемыми образцами.

Результаты по содержанию аминокислот в исследуемых штаммах, культивируемых в третьей точке, представлены в таблице 7.

Анализ содержания аминокислот в третьей точке культивирования показал выраженные различия как по общему уровню накопления, так и по спектру синтезируемых аминокислот. Наиболее высокие суммарные концентрации аминокислот были зарегистрированы у штамма В-11264, что в 1,9 раза выше, чем у штамма В-2585. Штамм В-11264 продуцирует триптофан, глутаминовую кислоту, пролин и глицин. Штамм В-2585 характеризовался умеренным уровнем синтеза аминокислот, при этом для отдельных аминокислот (Lys, Met, Val) его показатели были значительно выше, чем у В-7951. Штамм В-7951 продуцировал аминокислоты в минимальных концентрациях, суммарное содержание которых было значительно ниже, чем у В-11264 и В-2585. Штаммы В-3242 и В-7573 не проявили продуктивности в отношении аминокислот при данных условиях культивирования, что свидетельствует о неспособности данных штаммов синтезировать аминокислоты в значимых количествах.

Продукция аминокислот у штаммов *Lactobacillus* определяется наличием протеолитической активности и способностью к гидролизу белков питательной среды с последующим накоплением отдельных аминокислот [45]. В работе A. Ulmer *et al.* показано, что у *Lactobacillus bulgaricus* накопление одних аминокислот (Ala, Ser, Lys, Tyr, Val) начинается уже на ранних стадиях культивирования, тогда как синтез других запускается спустя определенный период адаптации, что отражает включение клеток в активный метаболизм белка [46].

Способность штаммов *Lactobacillus* к синтезу и накоплению аминокислот является штамм-специфической и зависит от их метаболической активности, включая протеолиз белковых субстратов. Эти данные могут быть использованы для выбора перспективных штаммов для производства функциональных продуктов с высоким содержанием аминокислот.

Результаты по взаимной биосовместимости выбранных микроорганизмов представлены в таблице 8.

Анализ биосовместимости исследуемых штаммов показал, что большинство взаимодействий между микроорганизмами носит нейтральный или стимулирующий характер. Рост биомассы штамма В-11264 стимулировали метаболиты В-2585 и В-7951, в то время как остальные штаммы были биосовместимы и не оказывали влияния. Для штамма В-3242 стимулирующее воздействие отмечалось со стороны метаболитов В-11264 и В-7951, остальные – биосовместимы. Штамм В-7573 проявлял биосовместимость со всеми микроорганизмами. В то же время рост штамма В-2585 подавляли все метаболиты, продуцируемые остальными штаммами *Lactobacillus*. Штамм В-7951 оставался биосовместимым со всеми метаболитами, продуцируемыми штаммами *Lactobacillus*.

Таким образом, можно определить потенциальные консорциумы для дальнейшего исследования. Наиболее перспективными представляются комбинации

Таблица 7. Содержание аминокислот, продуцируемых объектами исследования в третьей точке

Table 7. Amino acids in Time Point 3

Аминокислота	Содержание аминокислот в образцах, мг/г					
	Среда MRS	B-11264	B-3242	B-7573	B-2585	B-7951
Триптофан (Trp)	н/о	16,2 ± 0,2	н/о	н/о	9,2 ± 0,1	1,3 ± 0,1
Глутаминовая кислота (Glu)	н/о	15,1 ± 0,2	н/о	н/о	6,9 ± 0,1	1,6 ± 0,1
Серин (Ser)	н/о	1,8 ± 0,1	н/о	н/о	0,8 ± 0,1	0,3 ± 0,1
Глицин (Gly)	н/о	19,1 ± 0,2	н/о	н/о	10,0 ± 0,1	1,3 ± 0,1
Гистидин (His)	н/о	4,2 ± 0,1	н/о	н/о	0,4 ± 0,1	0,4 ± 0,1
Глутамин (Gln)	н/о	0,7 ± 0,1	н/о	н/о	1,1 ± 0,1	0,4 ± 0,1
Аргинин (Arg)	н/о	1,7 ± 0,1	н/о	н/о	0,7 ± 0,1	0,1 ± 0,1
Лизин (Lys)	н/о	2,3 ± 0,1	н/о	н/о	3,6 ± 0,1	0,2 ± 0,1
Треонин (Thr)	н/о	1,1 ± 0,1	н/о	н/о	0,7 ± 0,1	0,6 ± 0,1
Аланин (Ala)	н/о	6,3 ± 0,1	н/о	н/о	2,6 ± 0,1	0,4 ± 0,1
Пролин (Pro)	н/о	21,8 ± 0,3	н/о	н/о	14,0 ± 0,2	2,8 ± 0,1
Аспарагин (Asn)	н/о	1,8 ± 0,1	н/о	н/о	0,3 ± 0,1	н/о
Тирозин (Tyr)	н/о	0,5 ± 0,1	н/о	н/о	0,4 ± 0,1	0,2 ± 0,1
Метионин (Met)	н/о	1,0 ± 0,1	н/о	н/о	1,6 ± 0,1	0,2 ± 0,1
Валин (Val)	н/о	5,3 ± 0,1	н/о	н/о	4,1 ± 0,1	0,3 ± 0,1
Цистеин (Cys)	н/о	1,4 ± 0,1	н/о	н/о	0,3 ± 0,1	0,2 ± 0,1
Цистин (Cyst)	н/о	3,2 ± 0,1	н/о	н/о	2,7 ± 0,1	0,5 ± 0,1
Лейцин (Leu)	н/о	3,4 ± 0,1	н/о	н/о	1,3 ± 0,1	0,3 ± 0,1
Изолейцин (Ile)	н/о	6,8 ± 0,1	н/о	н/о	2,3 ± 0,1	0,5 ± 0,1
Фенилаланин (Phe)	н/о	7,1 ± 0,1	н/о	н/о	1,7 ± 0,1	0,4 ± 0,1
Всего	н/о	120,9	—	—	64,9	11,7

Примечание: н/о – вещество не обнаружено.

Note: н/о – no substance detected.

Таблица 8. Результаты по взаимной биосовместимости выбранных микроорганизмов

Table 8. Biocompatibility patterns

Микробные метаболиты, содержащиеся в культуральной жидкости	Биомасса штаммов				
	B-11264	B-3242	B-7573	B-2585	B-7951
B-11264	+	++	+	–	+
B-3242	+	+	+	–	+
B-7573	+	+	+	–	+
B-2585	++	+	+	–	+
B-7951	++	++	+	–	+

Примечание: «+» – биосовместимы; «++» – стимуляция роста; «–» – подавление роста.

Note: “+” – biocompatible; “++” – growth promotion; “–” – growth suppression.

штаммов B-11264, B-3242, B-7573 и B-7951, поскольку они демонстрируют преимущественно нейтральные или стимулирующие взаимные взаимодействия, что свидетельствует о возможности их совместного применения при разработке консорциумов.

Выводы

В результате проведенного исследования установлено, что изученные штаммы *Lactobacillus* характеризуются выраженной штамм-специфичностью по основным функциональным и метаболическим показателям. Тип углеводного субстрата оказывает существенное влияние на ростовые характеристики штаммов, при

этом наибольшее увеличение оптической плотности во всех случаях наблюдалось при использовании лактулозы, что обосновывает ее выбор в качестве оптимального источника углевода для дальнейших исследований. Анализ антагонистической активности выявил способность ряда штаммов ингибировать рост патогенных и условно-патогенных микроорганизмов, при этом выраженность эффекта зависела как от штамма *Lactobacillus*, так и от вида тест-микроорганизма. Продукция витаминов группы B и органических кислот не имеет универсальной временной динамики и определяется преимущественно штамм-специфическими особенностями метаболизма. Выбор третьей временной

точки культивирования, соответствующей фазе отмирания культуры, позволил оценить сформировавшийся метаболический профиль штаммов, отражающий суммарную активность в течение всего цикла роста. Анализ аминокислотного состава показал, что отдельные штаммы, прежде всего В-11264 и В-2585, характеризуются более выраженной способностью к накоплению свободных аминокислот по сравнению с другими исследуемыми образцами. В совокупности полученные данные подтверждают перспективность отдельных штаммов *Lactobacillus* для дальнейшего использования в составе функциональных продуктов и пробиотических композиций. Согласно литературным данным, продуцируемые штаммами метаболиты могут оказывать влияние на липидный обмен (снижение холестерина и триглицеридов) [47], глюкозный обмен [48] и нормализацию микробиоты кишечника [49].

Наиболее перспективными для дальнейшего изучения представляются комбинации штаммов микроорганизмов В-11264, В-3242, В-7573 и В-7951, демонстрирующих преимущественно нейтральные или стимулирующие взаимодействия. Их биологическая активность требует оценки как *in vitro*, так и *in vivo*, включая изучение влияния на синтез метаболитов,

липидный и углеводный обмен, а также на состав и функциональное состояние микробиоты кишечника.

Совокупность полученных данных позволяет выдвинуть гипотезу о том, что рассматриваемые в работе штаммы могут быть перспективными пробиотиками, направленными на профилактику метаболических нарушений.

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 the information published in this article.

Conflict of interest

The authors declare that there are no competing interest regarding this publication.

Список литературы / References

1. Mu Q, Tavella VJ, Luo XM. Role of *Lactobacillus reuteri* in human health and diseases. Front. Microbiol. 2018;9:757. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.00757>
2. Хозиев А. М., Евдокимов И. А., Цугкиев Б. Г., Гогаев О. К., Кабисов Р. Г. и др. Применение штаммов лактобактерий с заданными технологическими свойствами в биотехнологии кисломолочного масла. Техника и технология пищевых производств. 2025. Т. 55. № 3. С. 552–557. [Khoziev AM, Evdokimov IA, Tsugkiev BG, Gogaev OK, Kabisov RG, et al. *Lactobacilli* strains with targeted technological properties in sour-cream butter biotechnology. Food Processing: Techniques and Technology. 2025;55(3):552–557. (In Russ.)] <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2025-3-2594>
3. Zimina MI, Sukhin SA, Babich OO, Noskova SYu, Abrashina AA, et al. Investigating antibiotic activity of the genus *Bacillus* strains and properties of their bacteriocins in order to develop next-generation pharmaceuticals. Food and Raw Materials. 2016;4(2):92–100. <http://doi.org/10.21179/2308-4057-2016-2-92-100>
4. Markowiak P, Slizewska K. Effects of probiotics, prebiotics, and synbiotics on human health. Nutrients. 2017;9(9):21. <https://doi.org/10.3390/nu9091021>
5. Li H-Y, Zhou D-D, Gan R-Y, Huang S-Y, Zhao C-N, et al. Effects and mechanisms of probiotics, prebiotics, synbiotics, and postbiotics on metabolic diseases targeting gut microbiota: A narrative review. Nutrients. 2021;13(9):3211. <https://doi.org/10.3390/nu13093211>
6. Vesnina AD, Frolova AS, Chekushkina DYU, Milentyeva IS, Luzyanin SL, et al. Gut microbiota and its role in development of chronic disease and aging. Foods and Raw Materials. 2026;14(1):174–197. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2026-1-668>
7. Кишилова С. А., Леонова В. А., Митрова В. А., Рожкова И. В. Современные биотехнологические решения в области использования молочнокислых бактерий для молочной промышленности: от селекции штаммов до пробиотических продуктов. Техника и технология пищевых производств. 2025. Т. 55. № 3. С. 624–633. [Kishilova SA, Leonova VA, Mitrova VA, Rozhkova IV. Advanced biotechnological solutions for lactic acid bacteria in dairy industry: from strain selection to probiotic products. Food Processing: Techniques and Technology. 2025;55(3):624–633. (In Russ.)] <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2025-3-2596>
8. Vougiouklaki D, Tsironi T, Tsantes AG, Tsakali E, Van Impe JFM, et al. Probiotic properties and antioxidant activity *in vitro* of lactic acid bacteria. Microorganisms. 2023;11(5):1264. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11051264>
9. Shah AB, Baiseitova A, Zahoor M, Ahmad I, Ikram M, et al. Probiotic significance of *Lactobacillus* strains: A comprehensive review on health impacts, research gaps, and future prospects. Gut Microbes. 2024;16(1):2431643. <https://doi.org/10.1080/19490976.2024.2431643>

10. Харитонов Д. В., Харитонов И. В., Просеков А. Ю. Разработка концепции создания синбиотиков и синбиотических молочных продуктов. Техника и технология пищевых производств. 2013. № 4. С. 91–94. [Kharitonov DV, Kharitonova IV, Prosekov AYU. The concept of synbiotics and symbiotic dairy products development. Food Processing: Techniques and Techology. 2013;31(4):91–94. (In Russ.) <https://elibrary.ru/RNIEON>
11. Веснина А. Д., Фотина Н. В., Просеков А. Ю., Козлова О. В., Дышлюк Л. С. Получение пробиотического консорциума на основе выделенных из коровьего молока штаммов. Молочнохозяйственный вестник. 2021. № 2. С. 107–121. [Vesnina AD, Fotina NV, Prosekov AYU, Kozlova OV, Dyshlyuk LS. Obtaining a probiotic consortium based on strains isolated from cow's milk. Dairy Herald. 2021;(2):107–121. (In Russ.)] https://doi.org/10.52231/2225-4269_2021_2_107
12. Веснина А. Д., Просеков А. Ю., Козлова О. В., Курбанова М. Г., Козленко Е. А. и др. Разработка пробиотического консорциума для людей с онкологическими заболеваниями. Вестник ВГУИТ. 2021. Т. 83. № 1. С. 219–232. [Vesnina AD, Prosekov AY, Kozlova OV, Kurbanova MG, Kozlenko EA. Development of a probiotic consortium for people with cancer. VSUET Bulletin. 2021;83(1):219–232. (In Russ.)] <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2021-1-219-232>
13. Pereira GVM, Coelho BO, Júnior AIM, Thomaz-Soccol V, Soccol CR. How to select a probiotic? A review and update of methods and criteria. Biotechnology Advances. 2018;36(8):2060–2076. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2018.09.003>
14. Sharifi-Rad J, Rodrigues CF, Stojanović-Radić Z, Dimitrijević M, Aleksić A, *et al.* Probiotics: Versatile bioactive components in promoting human health. Medicina (Kaunas). 2020;56(9):433. <https://doi.org/10.3390/medicina56090433>
15. Namiti VB, Nyerere AK, Kiiru JN. Stimulatory effects of simple sugars, honey, and selected defined minerals on growth vigor and production of inhibitory effects against selected Pathogens by a probiotic *Lactobacillus acidophilus* strain: An *in vitro* study. International Journal of Novel Research in Life Sciences. 2024;11(3):1–11. <https://doi.org/10.5281/zenodo.11108950>
16. Dimov I, Mollova D, Vasileva T, Bivolarski V, Nikolova M, *et al.* Metabolic profiling of probiotic strain *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *bulgaricus* L14 cultivated in presence of prebiotic oligosaccharides and polysaccharides in simulating *in vitro* gastrointestinal tract system. Biotechnology & Biotechnological Equipment. 2023;37(1):260–272. <https://doi.org/10.1080/13102818.2023.2178825>
17. Dong Y, Han M, Fei T, Liu H, Gai Z. Utilization of diverse oligosaccharides for growth by Bifidobacterium and *Lactobacillus* species and their *in vitro* co-cultivation characteristics. Int Microbiol. 2024;27:941–952. <https://doi.org/10.1007/s10123-023-00446-x>
18. Froböse NJ, Bjedov S, Schuler F, Kahl BC, Kampmeier S, *et al.* Gram staining: a comparison of two automated systems and manual staining. J Clin Microbiol. 2020;58(12):e01914-20. <https://doi.org/10.1128/JCM.01914-20>
19. Шевченко И. А. Радиотелеметрическое исследование температуры в желудочно-кишечном тракте. Казанский медицинский журнал. 1968. Т. 49. № 3. С. 14–17. [Shevchenko IA. Radiotelemetry study of temperature in the gastrointestinal tract. Kazan Medical Journal. 1968;49(3):14–17. (In Russ.)]
20. Гурьева В. И., Бачинская В. М., Шарапова Н. Р. Определение чувствительности пробиотических штаммов бактерий к антибактериальным препаратам диско-диффузионным методом. Вестник Марийского государственного университета. Серия «Сельскохозяйственные науки. Экономические науки». 2024. Т. 10. № 1. С. 9–16. [Guryeva VI, Bachinskaya VM, Sharapova NR. Determination of the sensitivity of probiotic bacterial strains to antibacterial drugs using the disk diffusion method. Bulletin of Mari State University. Series «Agricultural Sciences. Economic Sciences». 2024;10(1):9–16. (In Russ.)] <https://doi.org/10.30914/2411-9687-2024-10-1-9-16>
21. Davoodabadi A, Dallal MM, Foroushani AR, Douraghi M, Yazdi MKS, *et al.* Antibacterial activity of *Lactobacillus* spp. isolated from the feces of healthy infants against enteropathogenic bacteria. Anaerobe. 2015;34:53–58. <https://doi.org/10.1016/j.anaerobe.2015.04.014>
22. Pazhoohan M, Sadeghi F, Moghadami M. Antimicrobial and antiadhesive effects of *Lactobacillus* isolates of healthy human gut origin on Enterotoxigenic *Escherichia coli* (ETEC) and Enteroggregative *Escherichia coli* (EAEC). Microbial Pathogenesis. 2020;148:104271. <https://doi.org/10.1016/j.micpath.2020.104271>
23. Jomehzadeh N, Javaherizadeh H, Amin M, Saki M, Al-Ouqaili MTS, *et al.* Isolation and identification of potential probiotic *Lactobacillus* species from feces of infants in southwest Iran. International Journal of Infectious Diseases. 2020;96:524–530. <https://doi.org/10.1016/j.ijid.2020.05.034>
24. Serazetdinova YuR, Chekushkina DYU, Borodina EE, Kolpakova DE, Minina VI, *et al.* Synergistic interaction between Azotobacter and Pseudomonas bacteria in a growth-stimulating consortium. Foods and Raw Materials. 2025;13(2):376–393. <http://doi.org/10.21603/2308-4057-2025-2-651>
25. Frolova AS, Fokina AD, Milentyeva IS, Asyakina LK, Proskuryakova LA, *et al.* The biological active substances of *Taraxacum officinale* and *Arctium lappa* from the Siberian Federal District. International Journal of Molecular Sciences. 2024;25(6):3263. <https://doi.org/10.3390/ijms25063263>
26. Belashova OV, Kozlova OV, Velichkovich NS, Fokina AD, Yustratov VP, *et al.* A phytochemical study of the clover growing in Kuzbass. Foods and Raw Materials. 2024;12(1):194–206. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2024-1-599>
27. Фролова А. С., Чекушкина Д. Ю., Лосева А. И., Неверова О. А., Заушинцева А. В. и др. Потенциал молочно-кислых бактерий-пробиотиков с перспективой их использования в сыроделии. Сыроделие и маслоделие. 2025. № 4.

- C. 70–76. [Frolova AS, Chekushkina DYU, Loseva AI, Neverova OA, Zaushintsena AV, et al. Potential of lactic acid bacteria-probiotics with the prospects of their use in cheese making. Cheese and butter making. 2025;4:70–76. (In Russ.)] <https://doi.org/10.21603/2073-4018-2025-4-35>
28. Darbandi N, Komijani M, Abdoli A. Azithromycin therapy changed the intestinal microbiota, caused oxidative stress, and decreased memory function in adult wistar rats. Journal of Sciences, Islamic Republic of Iran. 2024;35(1):5–14. <https://doi.org/10.22059/jsciences.2024.374944.1007858>
29. Li T, Teng D, Mao R, Hao Y, Wang X, et al. A critical review of antibiotic resistance in probiotic bacteria. Food Research International. 2020;136:109571. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109571>
30. Dang HT, Dinh HS, Loc TA, Nguyen LA. Antibiotic resistance characteristics of potential probiotic *Lactobacillus* strains. Vietnam Journal of Science and Technology. 2023;61(6):975–983. <https://doi.org/10.15625/2525-2518/17261>
31. Sukarya IBJ, Pratiwi IDPK, Hapsari NMIA, Puspawati NN. Antibiotic resistance of indigenous lactic acid bacteria isolates of kombucha and dadih. Jurnal Ilmu dan Teknologi Pangan. 2021;10(4):734–745.
32. Ma Q, Pei Z, Fang Z, Wang H, Zhu J, et al. Evaluation of tetracycline resistance and determination of the tentative microbiological cutoff values in lactic acid bacterial species. Microorganisms, 2021;9(10):2128. <https://doi.org/10.3390/microorganisms9102128>
33. Soltani N, Abbasi S, Baghaeifar S, Taheri E, Jadid MFS, et al. Antibacterial and antibiofilm activity of *Lactobacillus* strains secretome and extraction against *Escherichia coli* isolated from urinary tract infection. Biotechnology Reports. 2022;36:e00760. <https://doi.org/10.1016/j.btre.2022.e00760>
34. Tigu F, Assefa F, Mehari T, Ashenafi M. Probiotic property of lactic acid bacteria from traditional fermented condiments: Datta and awaze. International Food Research Journal. 2016;23(2):770. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.33845.35041>
35. Li J, Chen X, Xie Z, Liang L, Li A, et al. Screening and metabolomic analysis of lactic acid bacteria-antagonizing *Pseudomonas aeruginosa*. Foods. 2023;12(14):2799. <https://doi.org/10.3390/foods12142799>
36. Sanam MUE, Detha AIR, Rohi NK. Detection of antibacterial activity of lactic acid bacteria, isolated from Sumba mare's milk, against *Bacillus cereus*, *Staphylococcus aureus*, and *Escherichia coli*. Journal of Advanced Veterinary and Animal Research. 2022;9(1):53–58. <https://doi.org/10.5455/javar.2022.i568>
37. Ravi S, Ananthan HB, Reddy BN, Sankar S, Natarajan SN, et al. Evaluation of antibacterial efficacy of two commercially available probiotics as intracanal medicament against *Enterococcus faecalis*: An *in vitro* study. J Contemp Dent Pract. 2023;24:157–161. <https://doi.org/10.5005/jp-journals-10024-3466>
38. Fateh M, Forohi F, Rafiee F. The antimicrobial effect of *Lactobacillus casei* against *Klebsiella pneumoniae* and *Escherichia coli* isolated from urinary samples. Journal of Advanced Biomedical Sciences. 2024;14(2):94–103. <http://dx.doi.org/10.18502/jabs.v14i2.15755>
39. Kim J-Y, Choi E-J, Lee J-H, Yoo M-S, Heo K, et al. Probiotic potential of a novel vitamin B₂-overproducing *Lactobacillus plantarum* strain, HY7715, isolated from kimchi. Applied Sciences. 2021;11(13):5765. <https://doi.org/10.3390/app11135765>
40. Kim S-H, Singh D, Son SYo, Lee S, Suh D H, et al. Characterization and temporal dynamics of the intra- and extracellular environments of *Lactiplantibacillus plantarum* using multi-platform metabolomics. LWT. 2023;175:114376. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.114376>
41. Laakso K, Koskeniemi K, Koponen J, Kankainen M, Surakka A, et al. Growth phase-associated changes in the proteome and transcriptome of *Lactobacillus rhamnosus* GG in industrial-type whey medium. Microbial Biotechnology. 2011;4(6):746–766. <https://doi.org/10.1111/j.1751-7915.2011.00275.x>
42. Khromova NY, Epishkina JM, Karetkin BA, Khabibulina NV, Beloded AV, et al. The combination of *in vitro* assessment of stress tolerance ability, autoaggregation, and vitamin B-producing ability for new probiotic strain introduction. Microorganisms. 2022;10(2):470. <https://doi.org/10.3390/microorganisms10020470>
43. Szczerbiec D, Piechocka J, Glowacki R, Torzewska A. Organic acids secreted by *Lactobacillus* spp. isolated from urine and their antimicrobial activity against uropathogenic *Proteus mirabilis*. Molecules. 2022;27(17):5557. <https://doi.org/10.3390/molecules27175557>
44. Wang J, Tang X, Qu C, Zhang Y, Zhang C, et al. Development of an LC-MS method for the quantitative determination of six organic acids produced by bacterial fermentation *in vitro* and *in vivo*. Processes. 2025;13(3):697. <https://doi.org/10.3390/pr13030697>
45. Liu E, Hao P, Konno T, Yu Y, Oda M, et al. Amino acid biosynthesis and proteolysis in *Lactobacillus bulgaricus* Revisited: A Genomic Comparison. Computation Molecular Bioscience. 2012;2(3):61–77. <http://dx.doi.org/10.4236/cmb.2012.23006>
46. Ulmer A, Erdemann F, Mueller S, Loesch M, Wildt S, et al. Differential amino acid uptake and depletion in monocultures and co-cultures of *Streptococcus thermophilus* and *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *bulgaricus* in a novel semi-synthetic medium. microorganisms. 2022;10(9):1771. <https://doi.org/10.3390/microorganisms10091771>
47. Wu Yu., Zhang Q., Ren Yi., Ruan Z. Effect of probiotic *Lactobacillus* on lipid profile: A systematic review and meta-analysis of randomized, controlled trials. PLoS One. 2017;12(6):e0178868. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0178868>

48. Qiu X, Wu Q, Li W, Tang K, Zhang J. Effects of *Lactobacillus* supplementation on glycemic and lipid indices in overweight or obese adults: A systematic review and meta-analysis. *Clinical Nutrition*. 2022;41(8):1787–1797. <https://doi.org/10.1016/j.clnu.2022.06.030>
49. Bermúdez-Humarán LG, Chassaing B, Langella P. Exploring the interaction and impact of probiotic and commensal bacteria on vitamins, minerals and short chain fatty acids metabolism. *Microbial Cell Factories*. 2024;23:172. <https://doi.org/10.1186/s12934-024-02449-3>

Дополнительная информация об авторах / Additional information about the authors

Фролова Анна Сергеевна / Anna S. Frolova ORCID 0000-0003-3988-8521; eLIBRARY SPIN 5194-7508
Милентьева Ирина Сергеевна / Irina S. Milentyeva ORCID 0000-0002-3536-562X; eLIBRARY SPIN 8227-2844
Колпакова Дарья Евгеньевна / Daria E. Kolpakova ORCID 0000-0002-8508-3372; eLIBRARY SPIN 5576-4258
Неверова Ольга Александровна / Olga A. Neverova ORCID 0000-0002-0309-5709; eLIBRARY SPIN 9255-4650
Юстратов Владимир Петрович / Vladimir P. Yustratov ORCID 0000-0002-1779-4332; eLIBRARY SPIN 3578-5617
Петров Андрей Николаевич / Andrey N. Petrov ORCID 0000-0001-9879-482X; eLIBRARY SPIN 2839-1773

<https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-1-2627>
<https://elibrary.ru/EANQZV>

Обзорная статья
<https://fptt.ru>

Пищевая добавка Е334 (винная кислота): актуальные вопросы контроля качества и безопасности



Д. О. Боков^{1,2,*}, В. В. Бессонов^{1,3}, А. Ю. Колеснов³

¹ Федеральный исследовательский центр питания, биотехнологии и безопасности пищи^{ROR}, Москва, Россия

² Первый Московский государственный медицинский университет им. И. М. Сеченова
Министерства здравоохранения Российской Федерации^{ROR}, Москва, Россия

³ Российский университет дружбы народов им. Патриса Лумумбы^{ROR}, Москва, Россия

Поступила в редакцию: 25.12.2025

Принята после рецензирования: 26.01.2026

Принята к публикации: 03.03.2026

*e-mail: fmmsu@mail.ru

© Д. О. Боков, В. В. Бессонов, А. Ю. Колеснов, 2026



Аннотация.

В современной пищевой промышленности, в т. ч. в виноградарстве и виноделии, соблюдение нормативов, контроль качества и безопасности готовой продукции являются одними из ключевых задач производителей с целью защиты интересов потребителей. В частности, при выборе пищевой добавки необходимо учитывать наличие стереоизомеров соединений, входящих в ее состав, и потенциальные риски при их применении. В связи с этим вопрос обоснованного применения конкретной изомерной формы оптически активного соединения, используемого в качестве пищевой добавки, представляется актуальным. Объектами исследования являлись научные публикации, обзоры, экспериментальные исследования, а также нормативно-техническая документация, посвященная стереоизомерам винной кислоты (2,3-дигидроксипентандиовой кислоты), включая природный правовращающий L(+)-изомер растительного происхождения, синтетические левовращающий D(-)- и правовращающий L(+)-изомеры, рацемическую смесь (DL-форму) и мезовинную кислоту. Особое внимание уделено L(+)-винной кислоте (пищевая добавка Е334), получаемой из растительного сырья (винограда и продуктов его переработки), а также D(-)- и L(+)-винным кислотам, синтезируемым из углеводородного сырья.

На основе анализа токсикологических данных и нормативных документов (ГОСТ, OIV, TP TC и др.) установлено, что ключевой причиной рекомендации природной L(+)-формы из растительного сырья выступает ее естественная метаболическая усвояемость организмом человека, в отличие от синтетических D(-)- и L(+)-изомеров из углеводородного сырья. Рассмотрены методы контроля свойств различных форм винной кислоты, а также методы оценки происхождения L(+)-винной кислоты.

Ключевые слова. Виноделие, Е334, винная кислота, качество, безопасность

Для цитирования: Боков Д. О., Бессонов В. В., Колеснов А. Ю. Пищевая добавка Е334 (винная кислота): актуальные вопросы контроля качества и безопасности. Техника и технология пищевых производств. 2026. Т. 56. № 1. С. 180–189. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-1-2627>

Food Additive E334 (Tartaric Acid): Quality Control and Safety



Dmitry O. Bokov^{1,2,*}, Vladimir V. Bessonov^{1,3},
Alexander Yu. Kolesnov³

¹ Federal Research Center of Nutrition, Biotechnology and Food Safety^{ROR}, Moscow, Russia

² First Moscow State Medical University of the Ministry of Health of the Russian Federation^{ROR}, Moscow, Russia

³ Peoples' Friendship University of Russia^{ROR}, Moscow, Russia

Received: 25.12.2025

Revised: 26.01.2026

Accepted: 03.03.2026

*e-mail: fmmsu@mail.ru

© D.O. Bokov, V.V. Bessonov, A.Yu. Kolesnov, 2026



Abstract.

Food safety being a primary concern for food producers, viticulture and winemaking are subject to strict regulations and quality control procedures. Before a food additive can be incorporated into a food formulation, it must be investigated for stereoisomers and associated potential risks. Selecting a specific isomeric form of an optically active compound to be used as a food additive is a critical task. This review explores scientific publications and regulatory documentation regarding such stereoisomers of tartaric acid (2,3-dihydroxybutanedioic acid) as natural dextrorotatory L(+) isomer of plant origin, synthetic levorotatory D(–) and dextrorotatory L(+)- isomers, racemic mixture (DL form), and mesotartaric acid. The research specifically focuses on L(+)-tartaric acid (food additive E334), obtained from grapes and their derivatives, as well as D(–)- and L(+)-tartaric acids synthesized from hydrocarbon raw materials. In addition, the article reviews the methods for monitoring the properties of different forms of tartaric acid as well as the methods for evaluation of origin of L(+)-tartaric acid.

Based on toxicological data and regulatory standards, L(+)-tartaric acid is preferred in winemaking due to its natural origin and metabolic compatibility. In contrast, the synthetic D(–)- and L(+)-tartaric acid form is poorly metabolized, which may pose potential health risks.

Keywords. Winemaking, E334, tartaric acid, quality, safety

For citation: Bokov DO, Bessonov VV, Kolesnov AY. Food Additive E334 (Tartaric Acid): Quality Control and Safety. Food Processing: Techniques and Technology. 2026;56(1):180–189. (In Russ.) <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-1-2627>

Введение

Винная кислота (2,3-дигидроксипутандиовая кислота) является одной из ключевых природных карбоновых кислот, играющих фундаментальную роль в биохимии растений и различных отраслях промышленности. Она выполняет в растениях важную физиологическую функцию, участвуя в регуляции осмотического давления и окислительно-восстановительных процессов. Винная кислота известна своим естественным присутствием в винограде, также она встречается и в других плодах, таких как цитрусовые, яблоки, вишня и тропические фрукты. Винная кислота используется преимущественно в продуктах, изготовленных на основе фруктового сырья (клюквы, винограда), например в винах, желе и кондитерских изделиях. В современных условиях в промышленных масштабах винную кислоту получают из отходов винодельческой промышленности, что делает ее производство важным элементом экономики замкнутого цикла в виноделии, снижающим экологическую нагрузку. Винная кислота – одна из наименее антимикробных органи-

ческих кислот, описанных в научной литературе [1]: она инактивирует меньше микроорганизмов и слабее подавляет их по сравнению с большинством других органических кислот (например уксусной, лимонной, пропионовой и т. д.). Однако ее низкая антимикробная активность компенсируется высокими хелатирующими свойствами и стабильностью в широком диапазоне pH, что особенно ценно в качестве синергиста антиоксидантов.

Винная кислота существует в форме трех стерео-изомеров: L(+), D(–), мезо-формы (диастереомер, мезовинная кислота) и рацемата (виноградная кислота). L(+)-Винная кислота – это природный правовращающий изомер, содержащийся в винограде и других растениях и широко применяющийся в пищевой (в т. ч. в виноделии) и фармацевтической промышленности. Ее хиральная чистота является ключевым индикатором натуральности и соответствия стандартам качества в пищевых продуктах и винах. D(–)-Винная кислота – левовращающий изомер, который получают химическим синтезом из углеводородного сырья (нефть, уголь

и т. п.) или комбинированным способом – химическим и биотехнологическим синтезом. Кроме того, при синтезе D(–)-винной кислоты могут образовываться диастереомер и рацемат. Процесс синтеза, как правило, включает окисление малеинового ангидрида в присутствии катализаторов с последующим разделением рацемической смеси, что обуславливает риски присутствия технологических примесей. Известен синтетический L(+)-изомер винной кислоты, который получают аналогично D(–)-изомеру комбинированным химическим и биотехнологическим способом.

В пищевой промышленности винная кислота и ее соли (тарtrate) используются в качестве регуляторов кислотности, антиоксидантов и разрыхлителей. Тарtrate калия и кальция также применяются в качестве эмульгирующих солей и стабилизаторов в мясной и молочной промышленности. В виноделии применяется исключительно L(+)-винная кислота натурального (растительного) происхождения для коррекции кислотности сусла и вина. Это связано не только с ее происхождением, но и с нормативными требованиями. Использование любого другого изомера считается фальсификацией и может негативно повлиять на органолептические свойства и стабильность вина.

Основные запасы L(+)-винной кислоты в винограде сосредоточены в его твердых частях: гребнях, кожице и семенах, где она существует в виде соли (битарtrate калия), которую выделяют кислотным экстрагированием [2]. Концентрация кислоты сильно варьируется в зависимости от сорта винограда, условий выращивания (терруара) и степени зрелости ягод.

Несмотря на то что D(–) и L(+) формы являются зеркальными изомерами и обладают идентичными физико-химическими свойствами в нехиральной среде, их физиологическое воздействие на организм и метаболизм может различаться, что объясняется хиральной селективностью ферментов и рецепторов в биологических системах, где, как правило, активным выступает только один энантиомер. Целью исследования является комплексный сравнительный анализ синтетических D(–)/L(+)-изомеров и природной L(+) формы винной кислоты растительного происхождения для обоснования причин, по которым международные и национальные нормативные документы (в частности, стандарты Международной межправительственной организации винограда и вина OIV, национальные и межгосударственные стандарты ГОСТ Р/ГОСТ) предписывают использование исключительно L(+)-изомера натурального происхождения в виноделии и смежных отраслях.

Объекты и методы исследования

Проведен информационно-аналитический обзор научной литературы и нормативной документации по теме исследования с использованием баз данных PubMed, Scopus, Web of Science, eLIBRARY.RU, Pubchem и поисковых систем Google, Yandex. Используются

ключевые слова и их комбинации: винная кислота, D(–)-винная кислота, L(+)-винная кислота, tartaric acid isomers, D-tartaric acid, виноградная кислота, винный камень, L-tartaric acid, metabolism, toxicity, winemaking regulations, ГОСТ винная кислота, ОИВ винная кислота. Хронологический охват публикаций составил период 1925–2025 гг., с акцентом на самые современные исследования.

Результаты и их обсуждение

Нормативная документация. *Межгосударственный стандарт ГОСТ 21205-2024.* Дата введения стандарта – 01.12.2025 г.; взамен ГОСТ 21205-83 – согласно протоколу Межгосударственного совета по стандартизации, метрологии и сертификации от 31.10.2024 г. № 178-П и приказу Росстандарта от 13.11.2024 г. № 1662-ст.

Настоящий стандарт распространяется на пищевую добавку – кристаллическую винную кислоту L(+) E334 растительного происхождения (далее — винная кислота L(+) E334), предназначенную для применения в производстве пищевых продуктов в качестве регулятора кислотности, антиокислителя или вкусоароматического вещества (Ru 08.018, FEMA3044, CAS 133-37-9).

В стандарте представлены сведения о структурной формуле, приведено описание таких характеристик, как растворимость, внешний вид при выработке из винного камня и другого винодельческого сырья, органолептические свойства (внешний вид, цвет, запах, вкус). Нормируются физико-химические показатели – идентификация L(+) E334, массовая доля основного вещества (не менее 99,5 %), массовая доля золы (не более 0,3 %), массовая доля свободной серной кислоты (не более 0,03 %), массовая доля хлоридов (не более 0,01 %), массовая доля сульфатов (не более 0,2 %), тесты на оксалаты с уксусным кальцием, барий с серной кислотой, ферроцианиды с хлорным железом (выдерживает испытание), угол удельного оптического вращения $[\alpha]^{20}_D$ (от +11,5° до +12,5°). Для оценки происхождения нормируется изотопный состав углерода $^{13}C/^{12}C$ ($\delta^{13}C$), который для натуральной L(+)-винной кислоты должен лежать в интервале от –24,0 до –21,0 ‰. Регламентируется содержание тяжелых металлов (ртути, свинца) и мышьяка. Устанавливаются требования к сырью и технологическим вспомогательным средствам для производства L(+) E334. Допустимым является сырье растительного происхождения, в т. ч. жидкие и твердые отходы виноделия, а также аналогичное сырье растительного происхождения, обеспечивающее получение винной кислоты L(+) E334 в соответствии с требованиями стандарта. Под аналогичным сырьем подразумеваются другие богатые тарtrate плоды, такие как тамаринд или плоды баобаба, использование которых должно быть документально подтверждено. Для получения L(+)-винной кислоты запрещается использование углеводородного сырья, в т. ч. угля, нефти и продуктов

ее переработки, а также продуктов химического и нефтехимического синтеза – малеинового ангидрида, бензола, бутана, эпoxисукцинатов и др. В стандарте устанавливаются требования к упаковке, маркировке, приемке, транспортированию и хранению. Требования безопасности относят L(+) E334 к умеренно опасным веществам – третьему классу опасности. Массовую долю винной кислоты определяют методом алкаиметрического титрования (титрант – гидроокись натрия 1 моль/дм³, индикатор – фенолфталеин).

Технический регламент Таможенного союза 029/2012 «Требования безопасности пищевых добавок, ароматизаторов и технологических вспомогательных средств». Документ устанавливает единые обязательные для применения и исполнения требования к пищевым добавкам, ароматизаторам и технологическим средствам, а также их содержанию в пищевой продукции, обеспечивая свободное перемещение указанных веществ.

L(+)-Винная кислота (индекс E334) входит в перечень пищевых добавок, разрешенных для применения при производстве пищевой продукции в качестве регулятора кислотности и антиокислителя. Регламентируются гигиенические нормативы применения винной кислоты (E334) и тартратов калия (E336), кальция (E354), натрия (E335), натрия-калия (E337). В документе приведены требования безопасности и критерии чистоты пищевых добавок. В них указаны индекс (E334), название добавки (Винная кислота, L(+)- (TARTARIC ACID, L(+)-), технологические функции (регулятор кислотности, антиокислитель), содержание основного вещества (не нормируется), токсичных элементов, таких как мышьяк (не более 1 мг/кг), свинец (не более 1 мг/кг), ртуть (не более 1 мг/кг), кадмий (не нормируется). Отсутствие нормы по кадмию объясняется тем, что его присутствие в растительном сырье для получения винной кислоты маловероятно, однако контроль этого элемента может осуществляться по общим требованиям к содержанию токсичных элементов в пищевых добавках. Регламентируется максимальный уровень содержания винной кислоты в готовых к употреблению продуктах – для бисквитов и сухариков, предназначенных для здоровых детей первого года жизни и для питания детей в возрасте от года до трех лет, установлено остаточное количество не более 500 мг/кг. Устанавливается максимальный уровень винной кислоты в ряде пищевых продуктов (продукты из какао и шоколада, фруктовые соки и др.).

Международный винодельческий кодекс и монография COEI-1-LTARAC OIV. В данных документах приводится описание и контроль качества L(+)-винной кислоты. Согласно определению монографии OIV – это натуральная кислота, получаемая из винограда и используемая для подкисления сусла и вина в условиях, предусмотренных регламентом. Кодекс рекомендует указывать в маркировке L(+)-винной кислоты ее наименование (L-винная кислота или L(+)-

винная кислота) и чистоту (более 99,5 %). Приведены сведения о физических свойствах (описание кристаллов винной кислоты, цвет, вкус), растворимости в воде, этиловом спирте, глицерине, этиловом эфире, а также оптической активности (угол вращения $[\alpha]^{20}_D$ от +11,5 до +12,5°). Представлены показатели подлинности – кислая реакция среды 1 % раствора L(+)-винной кислоты в присутствии метилового оранжевого; фиолетовое окрашивание с сульфорезорциновым реактивом в присутствии концентрированной серной кислоты; образование кристаллизованного осадка с ацетатом калия; проба с хлороформом или дихлорметаном, позволяющая отличить винную кислоту от лимонной (как примеси). Цветная реакция с сульфорезорцином является специфичной для винной кислоты, т. к. основана на образовании фурфурола при ее дегидратации серной кислотой с последующей конденсацией с реагентом. Приводятся необходимые испытания на присутствие посторонних примесей, сульфатной золы, хлоридов, сульфатов, лимонной кислоты, щавелевой кислоты и бария, а также на содержание металлов – железа (менее 10 мг/кг), свинца (менее 5 мг/кг), ртути (менее 1 мг/кг), мышьяка (менее 3 мг/кг). Количественное определение L(+)-винной кислоты рекомендуется проводить методом алкаиметрического титрования (титрант – 1 М натрия гидроксид, индикатор – фенолфталеин). Регламентирован порядок хранения L(+)-винной кислоты¹. Монография предписывает хранить кислоту в хорошо закрытой таре, в сухом и прохладном месте, что предотвращает как поглощение влаги и слеживание, так и возможное поверхностное окисление.

Технический регламент Евразийского экономического союза 047/2018 «О безопасности алкогольной продукции». Данный регламент служит основополагающим документом, обеспечивающим единство обязательных для исполнения требований на всем рынке ЕАЭС и направленным на защиту жизни и здоровья потребителей. Он устанавливает требования к алкогольной продукции и сопутствующим в ее обращении процедурам (реализация, утилизация, хранение и т. д.). Винная кислота входит в перечень технологических средств, разрешенных для производства винодельческой продукции. Она применяется для подкисления с целью повышения кислотности вина не более чем на 2,5 г/дм³ в пересчете на винную кислоту, а также для кислотопонижения (наряду с нейтральным тартратом калия, тартратом кальция, карбонатом кальция, который может содержать незначительное количество двойной соли кальция L(+)-винной кислоты и L(–)-яблочной кислоты, однородного тонкодиспергированного препарата винной кислоты и карбоната кальция в различных пропорциях). Установление предельной величины подкисления (2,5 г/дм³) продиктовано

¹ International Oenological codex. URL: <https://www.oiv.int/public/medias/4084/e-coei-1-ltarac.pdf> (дата обращения 23.10.2025).

необходимостью сохранения типичности вина и предотвращения злоупотреблений, которые могут маскировать дефекты сырья или технологические ошибки. Для обработки винодельческой продукции с целью стабилизации к помутнениям рекомендованы метавинная кислота и DL-винная кислота (рацемическая кислота) или ее нейтральная соль калия для осаждения избытка кальция.

Делегированный регламент Комиссии (ЕС) 2019/934.

Данный документ дополняет Регламент (ЕС) № 1308/2013 Европейского парламента и Совета в отношении винодельческих районов, где может быть увеличена крепость алкоголя, разрешенных энологических практик и ограничений, применяемых к производству и консервированию продуктов из винограда, а также минимального процентного содержания алкоголя в побочных продуктах и их утилизации. В регламенте установлены условия и ограничения использования для винной кислоты. Для подкисления винная кислота может использоваться только для продуктов, которые получены из винограда сортов Эльблинг и Рислинг, выращенного и собранного в Германии в винодельческой зоне А. L(+)-Винная кислота должна иметь сельскохозяйственное происхождение и быть извлечена непосредственно из винограда и / или продуктов его переработки (например из винодельческой продукции). Таким образом, термин «сельскохозяйственное происхождение» юридически закрепляет запрет на использование кислоты, полученной путем химического и биотехнологического синтеза из ископаемого сырья, даже если она представляет собой чистый L(+)-энантиомер. Регламент устанавливает, что такие производные L(+)-винной кислоты, как тартрат кальция, тартрат калия, метавинная кислота должны иметь сельскохозяйственное происхождение. DL-Винная кислота или ее нейтральная калиевая соль могут применяться только для осаждения избытков кальция. При этом использование DL-винной кислоты допускается только под наблюдением энолога или техника, официально утвержденного органами власти государства-члена Европейского Союза².

Регламент Комиссии (ЕС) № 231/2012. Данный регламент устанавливает спецификации для всех пищевых добавок, разрешенных в Европейском Союзе, обеспечивая единый стандарт качества и безопасности на общем рынке. Спецификация для E334 L(+)-винной кислоты (или же винной кислоты) представлена в разделах «Определение», «Описание», «Идентификация», «Чистота». Раздел «Определение» включает в себя идентификатор, химическое наименование, химическую формулу, молекулярную массу, содержание соединения (не менее 99,5 % в пересчете на безводную массу). В «Описании» приведена следующая характеристика L(+)-винной кислоты: бесцветное или полупрозрач-

ное кристаллическое твердое вещество или белый кристаллический порошок. Раздел «Идентификация» содержит следующие показатели: диапазон плавления (168–170 °C), тест на тартраты (должен давать положительный результат), удельное вращение ($[\alpha]^{20}_D$ от +11,5 до +13,5°). В разделе «Чистота» приводятся параметры: потеря в массе при высушивании (не более 0,5 %), сульфатная зола (не более 1000 мг/кг после прокалывания при 800 ± 25 °C), свинец (не более 2 мг/кг), ртуть (не более 1 мг/кг), оксалаты (не более 100 мг/кг в пересчете на щавелевую кислоту после высушивания)³. Ограничение по оксалатам имеет особое значение, т. к. их повышенное содержание может указывать на некачественную очистку от побочных продуктов или на использование некондиционного сырья.

Свод федеральных правил управления по санитарному надзору за качеством пищевых продуктов и медикаментов (FDA). Свод федеральных правил FDA устанавливает, что пищевая винная кислота ($C_4H_6O_6$, регистрационный номер CAS 87-69-4) имеет L-конфигурацию. L(+)-Форма винной кислоты в растворе является правовращающей и также известна как L(+)-винная кислота. Винная кислота встречается в виде бесцветных или полупрозрачных кристаллов либо белого кристаллического порошка. Она не имеет запаха и обладает кислым вкусом. Ее получают как побочный продукт при производстве вина.

В своде указано, что L(+)-винная кислота общепризнана безопасным ингредиентом (Generally Recognized As Safe – GRAS) для пищевых продуктов и используется в качестве уплотнителя, усилителя вкуса, ароматизатора, увлажнителя, регулятора кислотности. Статус GRAS означает, что безопасность данного вещества подтверждена либо длительной историей употребления до введения в 1958 г. поправки о пищевых добавках (Food Additives Amendment of 1958), либо результатами научных исследований, и оно может использоваться в соответствии с принципами надлежащей производственной практики (GMP) без установления строгих количественных лимитов для большинства продуктов.

В документе представлена информация об использовании кислот в качестве корригентов свойств соков и вин. С соответствующими ограничениями могут быть добавлены только кислоты, встречающиеся в винограде или других фруктах и ягодах. При использовании другой кислоты или ее формы, не представленной в данном документе, заявителю необходимо предоставить подтверждающие документы, в т. ч. документальное подтверждение от Управления по санитарному надзору за качеством пищевых продуктов и медикаментов США (FDA), подтверждающее соответствие материала требованиям к пищевым добавкам, предусмотренным Федеральным законом о пищевых

² Commission Delegated Regulation (EU) 2019/934 of 12 March 2019. URL: https://eur-lex.europa.eu/eli/reg_del/2019/934/oj/eng (дата обращения 23.10.2025).

³ Commission Regulation (EU) № 231/2012 of 9 March 2012. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32012R0231> (дата обращения 23.10.2025).

продуктах, лекарственных и косметических средствах, в количествах, предлагаемых для конкретной обработки^{4,5}.

Технический регламент Таможенного союза 022/2011 «Пищевая продукция в части ее маркировки». Согласно пункту 4.11 ТР ТС 022/201, для пищевой продукции, полученной с применением ГМО, в т. ч. не содержащей дезоксирибонуклеиновую кислоту (ДНК) и белок, должна быть приведена информация «Генетически модифицированная продукция», или «Продукция, полученная из генно-модифицированных организмов», или «Продукция содержит компоненты генно-модифицированных организмов». В случае, если изготовитель при производстве пищевой продукции не использовал генно-модифицированные организмы, то содержание ГМО в пищевой продукции 0,9 % и менее является случайной или технически неустранимой примесью, и такая пищевая продукция не относится к продукции, содержащей ГМО. При маркировке такой пищевой продукции сведения о наличии ГМО не указываются. Кроме того, сведения о наличии ГМО не указываются в маркировке пищевой продукции в отношении использованных технологических вспомогательных средств, изготовленных из ГМО или с их использованием, для конкретной предполагаемой обработки.

Получение винной кислоты. Получение L(+)-винной кислоты. Промышленное получение L(+)-винной кислоты основано на ее выделении из природного растительного сырья (например из винограда, отходов виноделия – виноградных выжимок, винного камня, твердых и жидких осадков и др.). Основным источником служит винный камень, представляющий собой кислый тартрат калия, который образуется в виде осадка в процессе производства и выдержки вина. Очищенный осадок обрабатывают соляной кислотой, в результате чего образуется винная кислота, которую далее подвергают очистке активированным углем и перекристаллизации для получения товарного продукта [3].

Эффективность упомянутого метода получения L(+)-винной кислоты и выход продукта напрямую зависят от качества исходного сырья и климатических условий винодельческого региона, которые влияют на накопление тартратов в винограде.

В китайском патенте CN102452932B⁶ описывается многоступенчатый процесс очистки винного камня,

включающий ионный обмен (удаление катионов калия, кальция, тяжелых металлов и анионов органических кислоты) и кристаллизацию, с целью получения L(+)-винной кислоты чистоты более 99,8 % и удаления металлических и органических примесей.

Описан способ получения L(+)-винной кислоты, включающий в себя несколько этапов: кислотное экстрагирование винной кислоты в виде битартрата калия, осаждение битартрата калия гидроксидом или хлоридом кальция, очистка полученной суспензии (виннокислой извести) фильтрованием, гидролиз в сильнокислой среде и обработка двух- и трехвалентными гексаацетатами калия для связывания железа, концентрирование отфильтрованного раствора L(+)-винной кислоты кристаллизацией [2]. В Российской Федерации запатентован новый способ получения L(+)-винной кислоты из растительного сырья и отходов его переработки (например виноградных выжимок, твердых и жидких осадков, образующихся при изготовлении винодельческой продукции). Способ описан в Евразийском патенте на изобретение № 052507 и содержит ряд современных инновационных технологических решений, применение которых позволяет получить натуральную L(+)-винную кислоту с чистотой не менее 99,5 % и выходом 6 % от количества исходного сырья – отходов винодельческой промышленности⁷.

Химический и биотехнологический синтез не применяется, т. к. приводит к образованию рацемической смеси D- и L-форм и других форм винной кислоты, которые не допустимы для применения в пищевой промышленности.

Получение D(–)-винной кислоты. D(–)-Винная кислота не имеет разрешения для использования в пищевой промышленности (особенно в виноделии) из-за своих метаболических особенностей. Поэтому ее применение крайне ограничено и носит узкоспециализированный, в основном научно-лабораторный и технический характер. D(–)-Винная кислота может использоваться в аналитической химии в качестве хирального стандарта, а также в исследованиях по стереоспецифичности ферментов и в синтезе специальных полимеров.

В отличие от натуральной L(+)-винной кислоты растительного происхождения D(–)-винная кислота почти не встречается в природе и требует целенаправленного синтеза. Основным методом синтетического получения этой формы винной кислоты является двухстадийный процесс, исходящий из малеинового ангидрида, который, в свою очередь, производится путем окисления бензола или бутана – продуктов нефтепереработки. Первая стадия – химический синтез рацемата винной кислоты (например через эпокси-

⁴ Code of Federal Regulations. URL: <https://www.ecfr.gov/current/title-21/chapter-I/subchapter-B/part-184/subpart-B/section-184.1099> (дата обращения 28.10.2025).

⁵ Wine treating materials and related regulations. A Rule by the Alcohol and Tobacco Tax and Trade Bureau on 08/24/2022. URL: <https://www.federalregister.gov/documents/2022/08/24/2022-18060/wine-treating-materials-and-related-regulations> (дата обращения 28.10.2025).

⁶ Preparation method for L-(+)-tartaric acid. Chinese patent. CN102452932B. 2011. (In Chinese). URL: <https://patentimages.storage.googleapis.com/41/53/1d/6a34426f32e052/CN102452932B.pdf> (дата обращения 01.11.2025).

⁷ Способ получения винной кислоты: пат. 052507 Евраз. пат. орг. / Пиорунский И. Д., Ямалиев Е. Г., Хромов А. В., Колеснов А. Ю., Чупрыненко И. В. и др.; опубл. 16.02.2026. URL: [https://www.eapatis.com/ms.asp?q=EATXT|4|QV|NONEED\\$EA202590714*ID](https://www.eapatis.com/ms.asp?q=EATXT|4|QV|NONEED$EA202590714*ID) (дата обращения 23.02.2026)

дирование и последующий гидролиз малеиновой кислоты). Поскольку данный процесс не является стереоспецифичным, он приводит к образованию смеси равных частей D(–)- и L(+)-энантиомеров. Вторая стадия – разделение рацемата. Наиболее исторически значимым методом является биологическое разделение по L. Pasteur [4], при котором микроорганизмы селективно утилизируют L(+)-форму, оставляя чистой D(–)-кислоту. Современные методы предполагают диастереомерное разделение с помощью хиральных аминов. Таким образом, D(–)-винная кислота служит продуктом целенаправленного, многостадийного и более затратного синтеза.

Для получения чистой синтетической L(+)-формы винной кислоты рацемическую смесь необходимо разделить, что является сложным и дорогостоящим процессом, в котором используется ряд небезопасных реагентов. Экономическая неэффективность такого пути усугубляется необходимостью гарантированного удаления следов токсичных катализаторов и органических промежуточных продуктов синтеза, что требует дополнительных ступеней очистки.

В настоящее время ввиду экономической нецелесообразности и неэкологичности данный метод получения винной кислоты не используется в пищевой промышленности.

Метаболизм и токсичность винных кислот. Экспериментальные исследования на различных видах млекопитающих, включая приматов, демонстрируют фундаментальное различие в метаболизме энантиомеров винной кислоты. При введении L(+)-винной кислоты, меченной радиоактивным изотопом углерода ^{14}C , радиоактивность быстро обнаруживается в выдыхаемом CO_2 , что свидетельствует о ее полном окислении в организме.

Метаболизм L(+)-винной кислоты происходит главным образом в печени и почках, где она последовательно окисляется до диоксида углерода и воды с участием специфических дегидрогеназ, интегрируясь в цикл трикарбоновых кислот или пути глюконеогенеза. D(–)-изомер практически не метаболизируется, более 80 % введенной дозы выводится с мочой в неизменном виде. Данный факт является прямым следствием стереоспецифичности ферментов, которые не способны катализировать реакции с синтетическим D(–)-энантиомером [5].

Основным ферментом, ответственным за начальный этап метаболизма L(+)-формы, выступает D-оксикислотная дегидрогеназа, которая инертна в отношении ее оптического антипода. Таким образом, именно неспособность к метаболизму и последующая нагрузка на выделительную систему представляет собой ключевую причину, по которой D(–)-винная кислота, а также рацемат и мезоформа запрещены к использованию в пищевых продуктах, в то время как натуральная L(+)-форма растительного происхождения признана безопасной.

В заключениях JECFA⁸ указано, что D(–)-винная кислота и мезовинная кислота плохо абсорбируются и выводятся с мочой в неизменном виде. Упоминаются исследования на крысах, где высокие дозы D(–)-изомера вызывали повреждение почек, в то время как L(+)-форма – нет [6].

Фермент, используемый в биотехнологическом способе изомеризации винной кислоты, не обладает высокой селективностью, что приводит к синтезу энантиомера D(–)-винной кислоты. Согласно исследованиям ФАО и ВОЗ, данный изомер абсолютно токсичен, поскольку человеческий организм не способен его усваивать. По оценкам он может накапливаться в почках, вызывая предрасположенность к развитию онкологических заболеваний. Потенциальная канцерогенность связывается не с прямым мутагенным действием, а с хроническим воспалительным процессом и пролиферацией клеток в ответ на постоянное кристаллическое повреждение почечных тканей, что создает условия для злокачественного перерождения⁹.

Ограничения применения синтетической винной кислоты. *Винная кислота, полученная химическим и биотехнологическим синтезом из продуктов переработки нефти, газа и угля.* Существует вероятность присутствия в синтетической L(+)-винной кислоте остаточных количеств промежуточных соединений (цис-эпоксисукцинат, малеинового ангидрида, малеиновой кислоты, фумаровой кислоты, а также производных бензола и бутанола и др.), что недопустимо для веществ, используемых в производстве фармацевтических препаратов и пищевых продуктов, особенно продуктов лечебно-профилактического назначения [7]. Даже следовые количества этих примесей могут вступать в нежелательные реакции с другими компонентами продуктов или лекарств, изменяя их свойства.

Тяжелые металлы в форме солей в качестве катализаторов. В качестве катализаторов при получении синтетической L(+)-винной кислоты используются соли ванадия, молибдена, вольфрама. При производстве содержание данных металлов должно тщательно контролироваться на предмет их отсутствия в конечном продукте ввиду их острой токсичности и канцерогенности^{10,11,12} [8]. Для полного удаления остаточных количеств тяжелых металлов из конечного продукта

⁸ L(+)-tartaric acid. Evaluations of the Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives (JECFA). World Health Organization. URL: <https://apps.who.int/food-additives-contaminants-jecfa-database/Home/Chemical/4746> (дата обращения 01.11.2025).

⁹ L(+)-tartaric acid...

¹⁰ Evaluation of certain food additives // Twenty-first report of the Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives. URL: <https://www.who.int/publications/i/item/9241206179> (дата обращения 01.11.2025).

¹¹ Toxicological Profile for Vanadium. URL: <https://www.atsdr.cdc.gov/ToxProfiles/tp58-p.pdf> (дата обращения 01.11.2025).

¹² Molybdenum in Drinking-water. Background document for development of WHO Guidelines for Drinking-water Quality. URL: https://cdn.who.int/media/docs/default-source/wash-documents/wash-chemicals/molybdenum.pdf?sfvrsn=d01920eb_4 (дата обращения 01.11.2025).

необходимо введение дополнительных технологических операций и сложного контроля, что увеличивает себестоимость производства и требует наличия высокотехнологичного аналитического оборудования (например масс-спектрометров с индуктивно-связанной плазмой).

Наличие ГМО. Производственный процесс в комбинированном способе получения синтетической L(+)-винной кислоты основан на использовании генетически модифицированного микроорганизма *Rhodococcus ruber*, иммобилизующего ключевой фермент, что вызывает дополнительные вопросы биобезопасности и регулирования, снижает уровень общественного доверия к продукции и может отвергаться потребителями, воздерживающимися от покупки продуктов, связанных с ГМО¹³. Также существуют потенциальные риски, связанные с возможной контаминацией производственных мощностей генетически модифицированными штаммами.

Методы анализа стереоизомерного состава винной кислоты без исследования ее происхождения. Анализ стереоизомерного состава винной кислоты требует применения особых подходов. Основная проблема заключается в том, что D(–) и L(+) формы обладают схожими физико-химическими свойствами в ахиральных условиях, что делает невозможным их прямое разделение стандартными хроматографическими методами, включая традиционную высокоэффективную жидкостную хроматографию (ВЭЖХ), которые не различают энантиомеры. Для решения этой задачи требуются специализированные методики, основанные на взаимодействии с хиральной средой. Селективность этих методов достигается за счет создания временных диастереомерных комплексов «аналит-селектор», которые обладают разной энергией стабилизации и, как следствие, разной скоростью миграции или удерживания в системе.

Поляриметрия. Метод основан на измерении угла вращения плоскости поляризованного света раствором исследуемого вещества. L(+)-Винная кислота является правовращающей. Определяется показатель удельного вращения $[\alpha]$ – для чистой L(+)-винной кислоты он составляет от +12 до +14° (конкретное значение зависит от концентрации, температуры и длины волны света). Значение близкое к 0° будет указывать на признак примеси рацемата (смеси D- и L-форм, которая оптически неактивна). Поляриметрия является преимущественно качественным и полуколичественным методом. Для точного количественного определения содержания D(–)-изомера в L(+)-винной кислоте необходимы более селективные методы. Несмотря на ограничения, поляриметрия остается важным экспрес-

методом входного контроля сырья в пищевой промышленности, позволяющим быстро выявить грубые отклонения от требуемой хиральной чистоты.

Хиральная высокоэффективная жидкостная хроматография (Хиральная ВЭЖХ). В качестве перспективного метода для количественного определения стереоизомеров винной кислоты может рассматриваться хиральная ВЭЖХ. Большинство хиральных разделений с помощью ВЭЖХ осуществляется путем прямого разделения с использованием хиральной неподвижной фазы (ХНФ). В этом методе хиральный разделяющий агент связывается или иммобилизуется на подходящем носителе для создания ХНФ, а энантиомеры разделяются путем образования временных диастереомерных комплексов между аналитом и неподвижной фазой. В последнее десятилетие фокус исследований в области хиральной ВЭЖХ сместился с поиска новых ХНФ на улучшение существующих [9]. Наибольшей эффективностью для разделения энантиомеров карбоновых кислот, включая винную, обладают фазы на основе макролидных антибиотиков (например тейкопланина), циклодекстринов и производных хинина [10, 11]. Ключевыми оптимизируемыми параметрами являются состав и pH элюента, поскольку они напрямую влияют на степень ионизации кислоты и механизм хирального узнавания.

Лигандобменный капиллярный электрофорез. Капиллярный электрофорез с использованием хиральных селекторов представляет собой высокоэффективный аналитический метод разделения энантиомеров, основанный на дифференциации их электрофоретической подвижности в условиях образования диастереомерных ассоциатов. Лигандобменный вариант данного метода основан на образовании координационных связей между энантиомером, центральным ионом металла и хиральным лигандом. D- и L-формы аналита образуют комплексы с различной пространственной геометрией и, следовательно, с разной константой устойчивости (K). В качестве хиральных лигандов могут использоваться аминокислоты (например L-гистидин) или органические кислоты (например D-хинная кислота) [12]. Как центральный ион металла чаще всего используется медь (II), реже цинк (II) или никель (II). Метод отличается высокой эффективностью (большим числом теоретических тарелок), малым расходом хирального селектора и возможностью быстрой оптимизации разделения за счет изменения состава фоновой электролитической среды. Его главным преимуществом является возможность разделения не только D- и L-форм, но и мезовинной кислоты в одном аналитическом акте, что делает метод особенно ценным для полного стереохимического анализа.

Методы исследования происхождения винной кислоты. Определение отношения изотопов $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ и $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ в L(+)-винной кислоте методом IRMS/SIRA-масс-спектрометрии изотопных отношений. Данный метод предлагается к использованию

¹³ Tartaric acid, benzene in the dish or toothpaste? Paolo De Castro seeks clarification from the European Commission. URL: <https://www.foodtimes.eu/planet/tartaric-acid-benzene-in-the-dish-or-toothpaste-paolo-de-castro-seeks-clarification-from-the-european-commission/> (дата обращения 10.11.2025).

для определения происхождения L(+)-винной кислоты, содержащейся как в составе чистых коммерческих препаратов, находящихся в продаже, так и в винах после их соответствующей пробоподготовки. Метод основан на измерении отношения стабильных изотопов углерода и кислорода, при этом данные по изотопному составу углерода являются определяющими для интерпретации результатов и оценке происхождения винной кислоты. В методе используется масс-спектрометр для измерения изотопных отношений (IRMS), соединенный с элементным анализатором (ЕА) и пиролизатором (Р), путем измерения ионных токов. В качестве нормативной основы в виде прикладного решения могут быть использованы методы, установленные в межгосударственном стандарте ГОСТ 21205-2024, а также официальный метод Международной межправительственной организации по виноградарству и виноделию OIV, закрепленный в резолюции OIV-OENO 691-2025¹⁴, принятой на 23 Генеральной ассамблее OIV, состоявшейся 20.06.2025 г. в Кишиневе (Республика Молдова). Российская Федерация как постоянный член OIV поддержала принятие данной резолюции и, соответственно, утверждение метода для применения в мировом виноградарстве и виноделии, в т.ч. в странах-членах OIV. Для проведения точных измерений необходимы эталонные материалы с сертифицированными изотопными соотношениями, а также тщательная калибровка оборудования. Интерпретация результатов основывается на сравнении полученных изотопных «отпечатков» ($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{18}\text{O}$) с базами данных эталонных образцов природной кислоты из различных регионов.

Выводы

Контроль качества и безопасности L(+)-винной кислоты (пищевая добавка Е334) в виноделии регулируется на международном, межгосударственном и национальном уровнях. Согласно действующим документам, которые устанавливают требования к качеству, в т. ч. по изотопному составу углерода, разрешается использовать для подкисления вин исключительно пищевую добавку Е334 – L(+)-винную кислоту, полученную из растительного сырья, например из винограда и продуктов его переработки – виноградные выжимки, винный камень, твердые и жидкие осадки). Основные требования к качеству натуральной L(+)-винной кислоты приведены в межгосударственном стандарте ГОСТ 21205-2024 «Добавки пищевые. Кислота винная L(+) Е334. Технические условия». Данный стандарт включен в проект перечня стандартов, предназначенных для обеспечения применения ТР ТС 029/2012 «Требования безопасности пищевых добавок, ароматизаторов и технологических вспомо-

гательных средств», а также используется в качестве нормативной ссылки для определения требования к пищевым добавкам, применяемым для изготовления пищевой продукции. Так например, в межгосударственном стандарте ГОСТ 33336-2015 «Вина игристые. Общие технические условия» и ряде других стандартах применяемая винная кислота должна соответствовать ГОСТ 21205.

Установленные требования обусловлены рядом рисков применения синтетических D(–)- и L(+)-форм винной кислоты: неусвояемостью организмом человека, возможным присутствием примесей катализаторов (тяжелых металлов), промежуточных продуктов синтеза и использованием генетически модифицированных организмов. Совокупность этих факторов убедительно демонстрирует, что синтетический путь получения винной кислоты несет неприемлемые риски для здоровья человека и уступает по безопасности традиционному природному источнику. В настоящее время в контроле качества винных кислот используются как классические (поляриметрия, алкалиметрическое титрование), так и современные перспективные инструментальные методы анализа (лигандообменный капиллярный электрофорез, хиральная ВЭЖХ). Для определения происхождения винной кислоты используются методы, основанные на исследовании стабильных изотопов легких элементов (например IRMS / SIRA масс-спектрометрии изотопных отношений). Для решения данной задачи также может быть использована спектроскопия ядерного магнитного резонанса (ЯМР) ядер протонов ^1H , дейтерия ^2H (D) и углерода ^{13}C , которая обладает практически неограниченным аналитическим потенциалом. Таким образом, современная регуляторная и аналитическая база создает надежный барьер для фальсификации, защищая как здоровье потребителей, так и репутацию винодельческой отрасли.

Критерии авторства

Д. О. Боков – постановка научной гипотезы, формулирование цели, проведение литературного обзора и подготовка статьи. В. В. Бессонов – осуществление общего руководства исследованием. А. Ю. Колеснов – редактирование статьи и формулирование выводов.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution

D.O. Bokov developed the scientific hypothesis, formulated the objective, conducted the review, and wrote the manuscript. V.V. Bessonov supervised the study. A.Yu. Kolesnov proofread the manuscript and formulated the conclusions.

Conflict of interest

The authors state that there is no conflict of interest.

¹⁴ Резолюция OIV-OENO 691-2025. Определение отношения изотопов $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ и $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ в L(+)-винной кислоте методом масс-спектрометрии изотопных отношений. URL: <https://www.oiv.int/ru/node/4092/download/pdf> (дата обращения 15.11.2025).

Список литературы / References

1. Gutler JB, Mai TL. Preservatives. Traditional Preservatives – Organic Acids. *Encyclopedia of Food Microbiology*. 2014;2:119–130. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384730-0.00260-3>
2. Хромов А. В., Корчагин В. В., Колеснов А. Ю., Ламердонова Ф. Х., Цимбалаев С. Р. и др. Проблемы выделения L-(+)-винной кислоты из винограда: материалы XIII Междунар. науч. конференции со школой молодых ученых «Химия и технология растительных веществ». Киров, 2024. Т. 1. С. 210. [Khromov AV, Korchagin VV, Kolesnov AY, Lamerdonova FKh, Tsimbalaev SR, *et al.* Isolating L-(+)-tartaric acid from grapes. *Proceedings of the XIII International Scientific Conference and the School of Young Scientists for Chemistry and Technology of Plant Substances*. Kirov, 2024;1:210. (In Russ.)]
3. Ullmann's encyclopedia of industrial chemistry. Weinheim: Wiley-VCH; 2011. 29456 p.
4. Pasteur L. Researches on the molecular asymmetry of natural organic products. Edinburgh: The Alembic Club; 1860. 56 p.
5. Eliel EL. Stereochemistry of Organic Compounds. New York: Wiley & Sons; 1994. 1267 p.
6. Gry J, Larsen LC. Metabolism of L(+)- and D(-)-tartaric acids in different animal species. *Toxicological Aspects of Food Safety*. 1977; Copenhagen. Heidelberg: Springer-Verlag; 1978. p. 351–353.
7. Хромов А. В., Корчагин В. В., Колеснов А. Ю., Ламердонова Ф. Х., Цимбалаев С. Р. и др. Оптические свойства L-(+)-винной кислоты из винограда с учетом особенностей ее выделения и очистки. *Виноградарство и виноделие*. 2024. Т. 53. С. 73–76. [Khromov AV, Korchagin VV, Kolesnov AY, Lamerdonova FK, Tsimbalaev SR, *et al.* Optical properties of L-(+)-tartaric acid from grapes taking into account the features of its isolation and purification. *Viticulture and Winemaking*. 2024;53:73–76. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/ZSTWJS>
8. Du H, Yu X, Yang T, Lu L, Sun J, *et al.* Unveiling the dark side of tungsten: A comprehensive review of its toxicity. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2025;301:118505. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2025.118505>
9. Ward KD, Bravenec AD, Ward TJ. Chiral separations by high-performance liquid chromatography. *Encyclopedia of Analytical Chemistry*. 2019;1–23. <https://doi.org/10.1002/9780470027318.a5905.pub3>
10. Armstrong DW, Tang Y, Chen S, Zhou Y, Bagwill C, *et al.* Macrocyclic antibiotics as a new class of chiral selectors for liquid chromatography. *Analytical Chemistry*. 1994;66(9):1473–1484. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2025.118505>
11. Berthod A, Qiu HX, Staroverov SM, Kuznestov MA, Armstrong DW. Chiral recognition mechanisms in enantiomers separations: A general view. *Chiral Recognition in Separation Methods: Mechanisms and Applications*. 2010;203–223. https://doi.org/10.1007/978-3-642-12445-7_1
12. Kodama S, Yamamoto A, Matsunaga A, Hayakawa K. Direct chiral resolution of tartaric acid in food products by ligand exchange capillary electrophoresis using copper (II)-d-quinic acid as a chiral selector. *Journal of Chromatography A*. 2001;932(1–2):139–143. [https://doi.org/10.1016/S0021-9673\(01\)01228-6](https://doi.org/10.1016/S0021-9673(01)01228-6)

Дополнительная информация об авторах / Additional information about the authors

Боков Дмитрий Олегович / Dmitry O. Bokov ORCID 0000-0003-2968-2466; eLIBRARY SPIN 7523-5909
Бессонов Владимир Владимирович / Vladimir V. Bessonov ORCID 0000-0002-3587-5347; eLIBRARY SPIN 2528-5383
Колеснов Александр Юрьевич / Alexander Yu. Kolesnov ORCID 0000-0003-2834-6225; eLIBRARY SPIN 6418-1500

<https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-1-2632>
<https://elibrary.ru/PBLDTL>

Оригинальная статья
<https://fptt.ru>

Оценка физико-химических и биотехнологических свойств материалов из морского коллагена



Ю. В. Куликова^{1,*}, Д. И. Спорышева², М. А. Ташкинов²,
С. Ю. Носкова¹, О. О. Бабич¹

¹ Балтийский федеральный университет им. И. Канта^{ROR}, Калининград, Россия

² Пермский национальный исследовательский политехнический университет^{ROR}, Пермь, Россия

Поступила в редакцию: 05.02.2026

Принята после рецензирования: 24.02.2026

Принята к публикации: 03.03.2026

*e-mail: stas-asp@mail.ru

© Ю. В. Куликова, Д. И. Спорышева, М. А. Ташкинов,

С. Ю. Носкова, О. О. Бабич, 2026



Аннотация.

Ввиду системных проблем агропромышленного сектора производственные мощности не соответствуют растущим объемам спроса на мясную продукцию, что создает предпосылки для возникновения ее дефицита в краткосрочной перспективе. Одним из стратегических направлений для обеспечения белковой безопасности населения является развитие технологий культивированного мяса. Ключевым элементом в его биопроизводстве выступает трехмерный каркас (скаффолд), от характеристик которого напрямую зависят структурно-механические свойства конечного продукта. В настоящее время сохраняется актуальная задача поиска и разработки материалов для скаффолдов, обеспечивающих формирование продукта с удовлетворительными органолептическими и текстурными характеристиками. Цель исследования – комплексный анализ физико-химических свойств морского коллагена, а также оценка его биотехнологического потенциала и потенциала гелей на его основе в качестве перспективного сырья для создания каркасов культивируемого мяса.

Объект исследования – коллаген из биомассы медузы *Aurelia aurita* и кожи обыкновенного судака (*Sander lucioperca*), полученный методом кислотной экстракции. Для изучения физико-химических свойств применяли электрофоретический метод Лэмли, метод капиллярного электрофореза, ИК-Фурье спектроскопию, МТТ-анализ для оценки выживания клеточных культур, 3D-печать на биопринтере.

Показано, что изучаемый коллаген состоит из двух полипептидных цепей (α -цепей и β -цепей) с молекулярной массой 240 кДа (биомасса *A. aurita*) и 220 кДа (кожа *S. lucioperca*). Выявлено, что коллаген имеет оптимальное значение изоэлектрической точки, необходимой для протекания процессов роста и развития культуры клеток. Благодаря наличию в составе коллагена гидроксипролина, глицина, пролина, обеспечивается жесткость молекулы и ее каркасные функции. Изучаемый коллаген характеризуется биосовместимостью и отсутствием цитотоксического эффекта.

Морской коллаген, полученный из биомассы *A. aurita* и кожи *S. lucioperca*, можно использовать в качестве биоматериала для создания каркасов, необходимых для производства культивируемого мяса. С практической точки зрения результаты настоящего исследования позволят расширить ассортимент биоматериалов, подходящих для технологий XXI в., включая инженерные технологии и технологии получения культивированного мяса.

Ключевые слова. Коллаген, морской коллаген, биоматериал, скаффолд, технология культивируемого мяса, *Aurelia aurita*, *Sander lucioperca*, биосовместимость, МТТ-анализ

Финансирование. Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, контракт № 075-15-2023-601 (доб. регистрационный № 13.2251.21.0219).

Для цитирования: Куликова Ю. В., Спорышева Д. И., Ташкинов М. А., Носкова С. Ю., Бабич О. О. Оценка физико-химических и биотехнологических свойств материалов из морского коллагена. Техника и технология пищевых производств. 2026. Т. 56. № 1 С. 190–202. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-1-2632>

Physicochemical and Biotechnological Properties of Marine Collagen Materials



Yuliya V. Kulikova^{1,*}, Daria I. Sporysheva²,
Mikhail A. Tashkinov², Svetlana Yu. Noskova¹, Olga O. Babich¹

¹ Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia

² Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia

Received: 05.02.2026

Revised: 24.02.2026

Accepted: 03.03.2026

*e-mail: stas-asp@mail.ru

© Yu. V. Kulikova, D. I. Sporysheva, M. A. Tashkinov, S. Yu. Noskova,
O. O. Babich, 2026



Abstract.

As the current agricultural production capacity fails to meet the growing demand for meat products, the global market might soon face meat shortages. Cultured, or cultivated, meat is a prospective solution to protein security challenges. Its bioproduction relies on a three-dimensional scaffold that defines the structural and mechanical properties of the final product. The food science is seeking new scaffolding materials that would yield cultured meat with targeted sensory and textural properties. This article describes the physical and chemical properties of marine collagen to evaluate its biotechnological potential as raw material for cultured meat scaffolds.

The study investigated collagen derived from jellyfish (*Aurelia aurita*) and zander skin (*Sander lucioperca*) obtained by acid extraction. The physicochemical characterization involved the Laemmli electrophoretic method, capillary electrophoresis, FTIR spectroscopy, MTT assay, and 3D bioprinting.

The collagen consisted of two polypeptide chains (α and β) with molecular weights of 240 kDa (*A. aurita*) and 220 kDa (*S. lucioperca*). The samples exhibited an optimal isoelectric point, which supported cell culture growth and development. Hydroxyproline, glycine, and proline provided molecules with robust scaffolding properties. The marine collagen demonstrated biocompatibility but no cytotoxicity.

The collagen samples from *A. aurita* biomass and *S. lucioperca* skin demonstrated good prospects as biomaterial for scaffolds in cultured meat production.

Keywords. Collagen, marine collagen, biomaterial, scaffold, cultured meat, *Aurelia aurita*, *Sander lucioperca*, biocompatibility, MTT analysis

Funding. The research was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, contract no. 075-15-2023-601 (13.2251.21.0219).

For citation: Kulikova YuV, Sporysheva DI, Tashkinov MA, Noskova SYu, Babich OO. Physicochemical and Biotechnological Properties of Marine Collagen Materials. Food Processing: Techniques and Technology. 2026;56(1):190–202. (In Russ.) <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-1-2632>

Введение

В последние десятилетия наблюдается устойчивый рост численности населения, что создает как новые возможности, так и беспрецедентные вызовы для человечества. Согласно последним статистическим прогнозам, мировое население к середине XXI в. увеличится на 38,6 % относительно текущей численности, что в свою очередь приведет к росту потребления растительного и животного продовольствия [1, 2]. При этом, ввиду системных проблем агропромышленного комплекса, включающих недостаточность кормовой базы, низкую производственную эффективность, высокий уровень создаваемого сельским хозяйством

экологического воздействия, существующие мощности не соответствуют прогнозируемому росту потребности в животном сырье, в частности в мясной продукции [1, 3, 4]. Для предотвращения дефицита протеина в рационе человека и минимизации риска развития патологий, обусловленных питанием и ассоциированных с белковой недостаточностью, требуется активизация развития перспективного научно-технологического направления – производства культивируемого мяса [5]. Данная технология представляет собой этическую альтернативу традиционному животноводству, характеризующуюся существенно сниженной экологической нагрузкой: сокращением выбросов

парниковых газов, минимизацией использования земельных и водных ресурсов, а также уменьшением количества задействованных сельскохозяйственных животных [4, 6]. Ключевым технологическим преимуществом производства культивированного мяса является отсутствие необходимости применения антибиотиков на стадии получения конечного продукта [4, 5]. Фундаментальным элементом в процессе биопроизводства выступает трехмерный каркас (скаффолд), который обеспечивает формирование необходимой гистоархитектоники продукта, адгезию, пролиферацию и последующую дифференцировку клеточных культур [4].

При конструировании биологических каркасов рассматривается широкий спектр природных полимерных молекул бактериального, растительного и животного происхождения, каждый из которых характеризуется уникальным комплексом функциональных преимуществ и технологических ограничений [4]. На текущем этапе развития технологии ключевой нерешенной проблемой остается отсутствие биоматериала, позволяющего получить конечный мясной продукт с удовлетворительными структурными и механическими характеристиками, сопоставимыми с традиционным мясом [7]. В связи с этим при построении технологии производства культивированного мяса приобретает особую актуальность задача разработки съедобных натуральных скаффолдов, способных формировать естественную трехмерную архитектуру, обеспечивать ретенцию влаги и стимулировать пролиферацию клеточных культур *in vitro* [7–9]. Согласно данным литературного анализа [7], основные научные усилия до настоящего времени были сосредоточены на оптимизации каркасов для интенсификации клеточного роста и улучшения физических параметров культивируемой ткани, тогда как целенаправленная модификация структурно-механических свойств конечного продукта посредством управления химической структурой каркасных материалов остается слабо проработанной. В данном контексте приобретает актуальность системный скрининг природных материалов по комплексу физико-химических и реологических показателей. Это необходимо для последующего создания искусственного мяса с воспроизводимыми и удовлетворительными структурными, механическими и органолептическими свойствами. В качестве перспективного базиса для создания скаффолдов нового поколения в аддитивном биопроизводстве культивированного мяса предлагается рассмотреть коллаген морского происхождения. Каркасные структуры на основе морского коллагена демонстрируют улучшенные резорбционные характеристики и сниженный аллергенный потенциал по сравнению с аналогами животного происхождения, а также минимизируют риски передачи зоонозных инфекций [10].

Коллаген представляет собой высокомолекулярный структурный белок внеклеточного матрикса [11–13],

образованный тройной спиралью из трех полипептидных α -цепей: две из них идентичны по аминокислотной последовательности, третья имеет отличный состав [11]. Посредством самосборки данные молекулы агрегируются в микрофибриллы, которые организуются в фибриллы, формирующие биологические волокна и пучки, что определяет его ключевую архитектурную функцию коллагена [11]. Биомолекула характеризуется высокой биоразлагаемостью, выраженной биосовместимостью и низкой иммуногенностью [4, 11], при этом коллаген морского происхождения демонстрирует наивысшие показатели биодоступности и безопасности [14].

Как отмечают R. Socrates *et al.* [11], коллаген обеспечивает эффективную адгезию, рост и пролиферацию клеточных культур, что в совокупности с превосходными физико-химическими характеристиками определяет его высокий потенциал в качестве каркасного материала. Технологическая пластичность коллагена позволяет получать на его основе материалы, находящиеся в разнообразных агрегатных состояниях (волокна, растворы, гели, порошки) и композитные материалы [11, 15–17], что обусловило его широкое применение в пищевой промышленности, биотехнологии, а также косметологии и регенеративной медицине на протяжении последних десятилетий [15–17]. Однако сохраняется существенный пробел в фундаментальных и прикладных знаниях о биотехнологических свойствах и методах модификации именно морского коллагена, определяющих перспективы его интеграции в технологии производства культивированного мяса.

В связи с этим цель исследования – комплексный анализ физико-химических параметров морского коллагена и оценка биотехнологического потенциала белка и гелей на его основе как перспективного сырья для конструирования скаффолдов следующего поколения в биопроизводстве культивированного мяса.

Объекты и методы исследования

Для реализации научно-исследовательской работы использовали два вида нативного кислоторастворимого коллагена, полученного из биомассы медузы *Aurelia aurita* (Калининград, Россия) и кожи обыкновенного судака *Sander lucioperca* (Калининград, Россия).

Коллаген из биомассы *A. aurita* и кожи *S. lucioperca* получали методом кислотной экстракции, описанным в работе [10]. Для этого на первом этапе экстракции биомассу *A. aurita* и кожу *S. lucioperca* промывали последовательно сначала дистиллированной водой в течение 24 ч, потом 0,1 М NaOH в течение 24 ч. Данная стадия позволила очистить биомассу от лишних солей и загрязняющих веществ. Затем биомассу измельчали ручным методом до образования кусочков размером 5–10 мм. Измельченную массу заливали 0,5 М уксусной кислоты в соотношении 1:10 (мас./об.). Полученную смесь оставляли на 48 ч при температуре 4 °C и постоянном помешивании для экстракции.

На следующей стадии экстракт отделяли от биомассы методом фильтрования. Процесс фильтрации вели через хлопчатобумажную ткань (медицинская стерильная марля, плотность 36,0 г/м²).

Для увеличения выхода коллагена процесс экстракции уксусной кислотой повторяли дважды. Полученные экстракты объединяли. К экстракту добавляли в сухом виде NaCl до конечной концентрации 0,9 М. Осадки собирали после центрифугирования при 3900 об/мин в течение 7 мин и растворяли в 0,5 М уксусной кислоты, диализировали против 0,1 М уксусной кислоты и дистиллированной воды в течение трех дней, а затем лиофилизировали [10] с использованием лиофильной сушки Иней-6 (ИБП РАН, Россия).

Для подтверждения нативной структуры коллагена изучали следующие показатели: молекулярную массу, изоэлектрическую точку и аминокислотный состав. В частности, данный метод позволяет выявить наличие характерных для коллагена аминокислот (гидроксипролина, глицина и пролина).

Молекулярную массу коллагена изучали электрофоретическим методом с использованием 7,5 % разделяющего полиакриламидного геля и 4 % концентрирующего геля [18]. Образец коллагена растворяли в 0,02 М натрий-фосфатном буфере (pH 7,2), содержащем 1 % SDS и 3,5 М мочевины. Затем полученную смесь смешивали с буфером для образцов Laemmli (Bio-Rad) в соотношении 1:1 с β -меркаптоэтанолом и без него и нагревали в течение 5 мин при температуре 95 °С. Каждый образец (20 мкг белка) загружали в лунку и запускали напряжение. Электрофорез проводили при напряжении 120 В в течение 90–120 мин [18].

Далее белковые полосы окрашивали путем выдержки в растворе красителя кумасси бриллиантового синего R-250. Для оценки приблизительной молекулярной массы образцов коллагена использовался высокомолекулярный предварительно окрашенный маркер 10–250 кДа (Servicebio, Китай).

Изоэлектрическую точку коллагена определяли путем приготовления кислых и щелочных растворов с различным pH, в которые вносили навески белка. Смеси перемешивали и инкубировали при комнатной температуре в течение 40 мин.

Дзета-потенциал растворов коллагена измеряли с помощью анализатора дзета-потенциала Photocor Compact-Z (ООО «Фотокор», Россия). Аликвоты объемом 2 мл переносили в кюветы с помощью универсальных электродов. Значение pH растворов регулировали 0,1 моль/л соляной кислотой или 0,1 моль/л гидроксидом натрия. Измерения дзета-потенциала проводились в пяти экземплярах для каждого раствора.

Изучение аминокислотного состава нативного коллагена проводили строго по методу, описанному в методике М-04-38-2009 «Определение протеиногенных аминокислот в комбикормах и сырье». Для измерения использовали систему капиллярного электрофореза 105 М (ООО «Люмэкс», Россия).

Для исследования применяли первичные фибробласты *Bos taurus* из биоптата кожи, полученного из области уха животного. Клетки высевали из расчета 20000 клеток на лунку в 24-луночный планшет. Клетки культивировали в течение 24 ч в присутствии образцов коллагена для оценки цитотоксических свойств коллагена и оценку влияния морского коллагена на пролиферацию клеток. После инкубации клетки отделяли от поверхности с помощью раствора трипсина, который затем нейтрализовали. Клеточную суспензию набирали пипеткой и смешивали с 4 % раствором трипанового синего (BD) в соотношении 1:1, инкубировали с красителем в течение 1–3 мин; в течение указанного времени происходило окрашивание нежизнеспособных клеток с поврежденными мембранами. Общее количество клеток, а также количество живых и мертвых клеток подсчитывали с использованием счетчика Luna-II (Logos Biosystems, Южная Корея).

Для получения гелей готовили раствор коллагена с концентрацией 6 мг/мл в 0,5 М уксусной кислоты. Значение pH было скорректировано до 8,0 по универсальной индикаторной бумаге с 5 М раствора гидроксида натрия при перемешивании при температуре 4 °С в течение 1 ч. Далее инкубировали 30 мин при 37 °С до гелеобразования [19–21]. В качестве гелеотвердителя добавляли однопроцентный раствор CaCl₂.

Далее формировали решеточные образцы из гелей на основе коллагена. Для этого осуществляли 3D-печать на биопринтере Rokit Dr. INVIVO 4D2 (Rokit, Южная Корея). Процесс печати вели при температуре 7 °С, соплом диаметром 0,4 мм. Для построения G-code использовали программное обеспечение NewCreatorK (Rokit, Южная Корея).

ИК-спектры коллагена и полученных высушенных продуктов снимались с использованием приставки НПВО на спектрометре ФСМ 2022 (Инфраспек, Россия) в диапазоне от 4000 до 400 см⁻¹ при разрешении 4 см⁻¹.

Данные были подвергнуты дисперсионному анализу с использованием программы Statistica 10.0 (StatSoft Inc, США). Для выявления выборок, существенно различающихся друг от друга, был проведен апостериорный анализ (тест Дункана).

Результаты и их обсуждение

На первом этапе работы были изучены основные физико-химические свойства коллагена, выделенного из биомассы *Aurelia aurita* и кожи *Sander lucioperca*, а также подтверждена его нативная структура и высокомолекулярная природа. Молекулярную массу коллагена определяли методом электрофореза (рис. 1).

Согласно полученным данным, изучаемые образцы коллагена *A. aurita* и *S. lucioperca* состоят из двух цепей (α -цепей и β -цепей). Молекулярная масса коллагена *A. aurita* составила 240 кДа, коллагена кожи *S. Lucioperca* – 220 кДа.

Другим показателем, характеризующим индивидуальность белка, является изоэлектрическая точка,

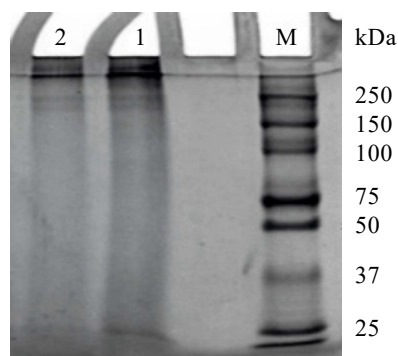


Рисунок 1. Электрофореграмма коллагена: М – маркер; 1 – нативный коллаген *Aurelia aurita*; 2 – нативный коллаген *Sander lucioperca*

Figure 1. Electropherogram of collagen: M – marker; 1 – native collagen derived from *Aurelia aurita*; 2 – native collagen derived from *Sander lucioperca*

величина которой зависит от аминокислотного состава и структуры молекулы [22, 23]. Значения изоэлектрической точки для коллагена *A. aurita* и кожи *S. lucioperca* составили 5,2 и 4,0 соответственно (рис. 2).

Известно, что коллаген в своей аминокислотной последовательности содержит глицин, пролин и гидроксипролин [24]. По наличию данных аминокислот в полипептидной цепи можно косвенно судить о том, что белок является коллагеном. Результаты аминокислотного состава, представленные на рисунке 3 и в таблице 1, свидетельствуют о том, что изучаемый белок содержит в своем составе значительное количество искоемых аминокислот (глицин, пролин) в количестве до 24 %.

Гидроксипролин обнаружить не удалось, поскольку стандарт данной аминокислоты для проведения калибровки отсутствовал. Вместе с тем совокупность физико-химических показателей (аминокислотный состав, изоэлектрическая точка, молекулярная масса) позволяет заключить, что из биомассы *A. aurita* и кожи *S. lucioperca* был выделен нативный коллаген.

На следующем этапе проводили оценку биотехнологического потенциала коллагенов по их способности влиять на степень пролиферации и жизнеспособность клеток (табл. 2). В ходе исследования установлено, что фибробласты коровы растут в присутствии коллагена в течение первых 24 ч практически одинаково: подсчет живых и мертвых клеток методом снятия их с поверхности и окрашивания трипановым синим показал, что во всех вариантах доля живых клеток превышает 70 %.

Далее из полученного коллагена были сформированы гели (рис. 4) для последующего использования в производстве клеточных каркасов методом 3D-печати.

В ходе исследования было выявлено, что гель на основе коллагенов из биомассы *A. aurita* и кожи *S. lucioperca* достаточно вязкий, способен сохранять форму и структуру. Таким образом, он может быть использован

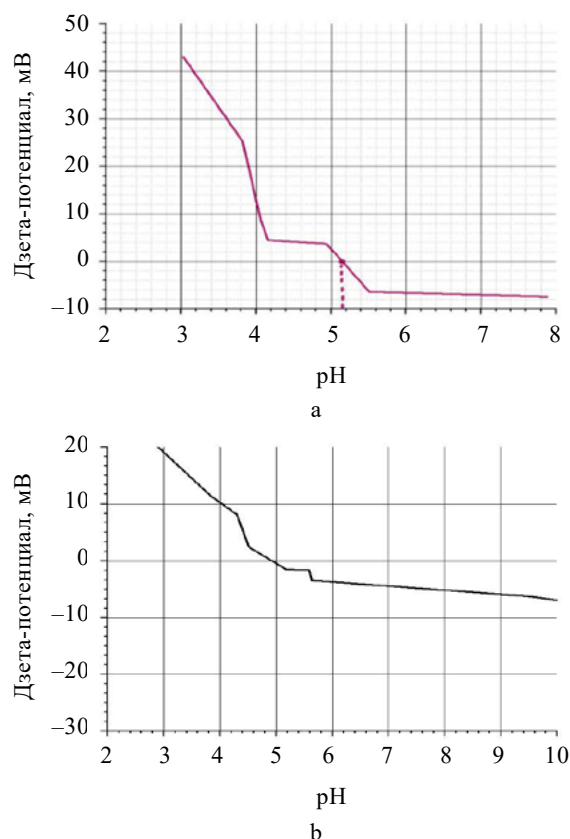


Рисунок 2. Дзета-потенциал коллагена: а – *Aurelia aurita*; б – *Sander lucioperca*

Figure 2. Zeta potential of collagen: a – *Aurelia aurita*; b – *Sander lucioperca*

для печати на 3D-биопринтере и создания каркасов для культивируемого мяса. Для подтверждения этой гипотезы на биопринтере Rokit Dr. INVIVO 4D2 проводили 3D-печать (рис. 5). В ходе исследования выявлено, что после заливания гели из коллагена медузы *A. aurita* и кожи *S. lucioperca* изменяют объем (происходит усадка), нити утончаются, что накладывает сложности в производстве объектов необходимых размеров и требует учета коэффициентов масштабирования.

Для исследования химической структуры сформированных гелей были получены ИК-спектры (рис. 6). На всех спектрах наблюдается пик амид А в области 3300–3500 cm^{-1} , соответствующий валентному колебанию N–H в структуре белковой молекулы. В области 1600–1700 cm^{-1} пик характеризует валентные колебания группы C=O (амид I). Другая характеристическая полоса белковых спектров – амид II – располагается вблизи области 1510–1570 cm^{-1} . Наличие данных пиков, независимо от их интенсивности, подтверждает коллагеновую природу исследуемого образца.

Проведенный комплексный анализ свидетельствует о перспективности использования коллагена, выделенного из биомассы *A. aurita* и кожи *S. lucioperca*, в качестве основы для формирования гелевых систем, пригодных

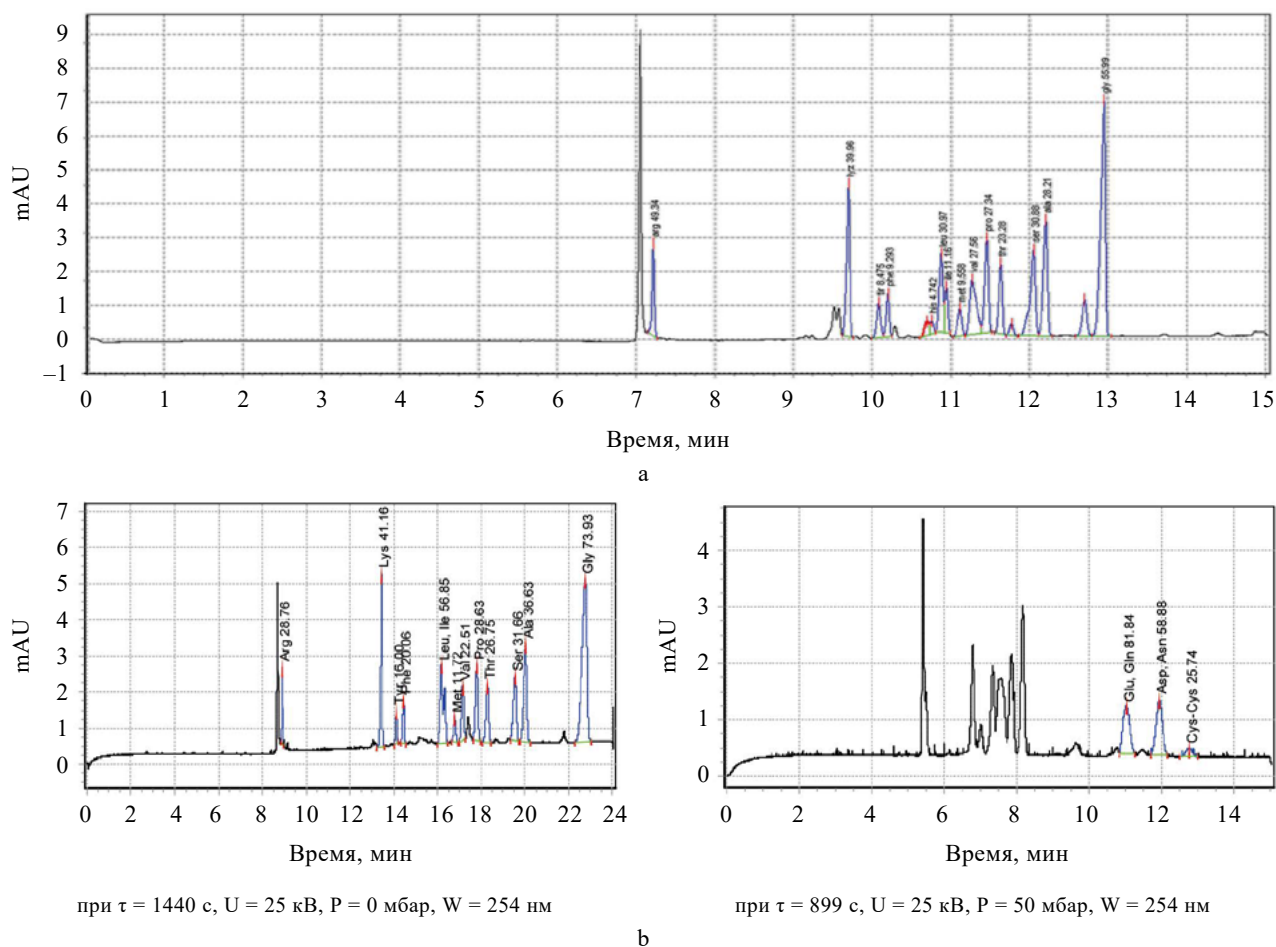


Рисунок 3. Электрофореограмма коллагена: а – *Aurelia aurita*; б – *Sander lucioperca*

Figure 3. Electropherogram of collagen: a – *Aurelia aurita*; b – *Sander lucioperca*

Таблица 1. Количественное содержание аминокислот, %

Table 1. Quantitative content of amino acids, %

Аминокислота	Коллаген <i>Aurelia aurita</i>	Коллаген <i>Sander lucioperca</i>
Валин (Val)	$2,76 \pm 0,56$	$2,20 \pm 0,90$
Пролин (Pro)	$2,73 \pm 0,64$	$2,80 \pm 0,70$
Треонин (Thr)	$2,33 \pm 0,42$	$2,60 \pm 1,00$
Серин (Ser)	$3,09 \pm 0,80$	$3,10 \pm 0,80$
Аланин (Ala)	$2,82 \pm 0,65$	$3,60 \pm 0,90$
Глицин (Gly)	$5,60 \pm 1,02$	$7,20 \pm 2,50$
Цистин (Cys)	–	$2,40 \pm 1,20$
Аспарагиновая кислота + аспарагин (Asp)	–	$5,50 \pm 2,20$
Глутаминовая кислота + глутамин (Glu)	–	$8,00 \pm 3,00$

Таблица 2. Процент живых клеток после 24 ч роста в присутствии образцов коллагена

Table 2. Living cell count after 24 h of growth with collagen samples

Образец	Живые клетки, %
Коллаген из биомассы <i>Aurelia aurita</i>	$80,67 \pm 0,58$
Коллаген из кожи <i>Sander lucioperca</i>	$79,85 \pm 0,96$
Контроль	$82,44 \pm 0,58$

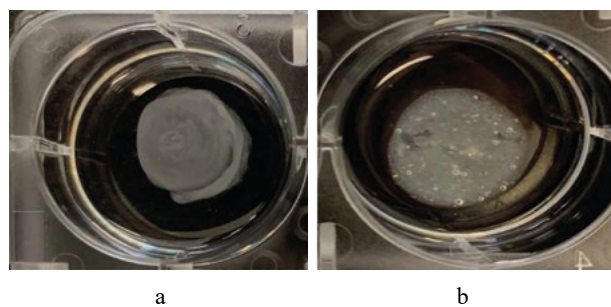


Рисунок 4. Процесс гелеобразования коллагена:
a – *Aurelia aurita*; b – *Sander lucioperca*

Figure 4. Collagen gelation: a – *Aurelia aurita*;
b – *Sander lucioperca*

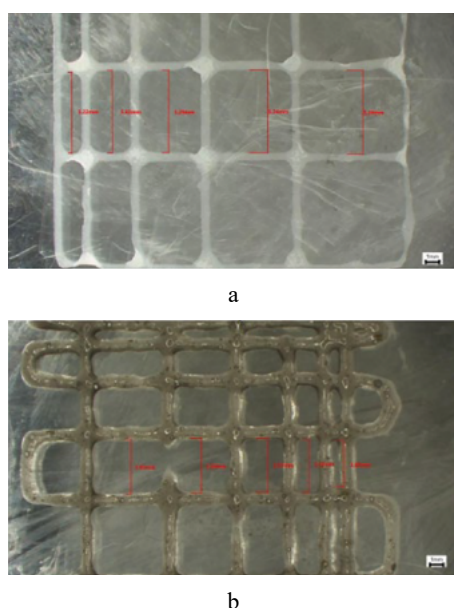


Рисунок 5. Образованные геометрические фигуры
при 3D-печати с помощью чернил из коллагена:
a – *Aurelia aurita*; b – *Sander lucioperca*

Figure 5. Geometric shapes formed during 3D-printing using
collagen ink: a – *Aurelia aurita*; b – *Sander lucioperca*

для создания биологических каркасов в биопроизводстве культивированного мяса. Согласно данным, полученным электрофоретическими методами, нативный коллаген из указанных источников характеризуется наличием двух полипептидных цепей (α - и β -цепей) с молекулярной массой приблизительно 240 кДа для образца *A. aurita* и 22 кДа для образца, выделенного из кожи *S. lucioperca* (рис. 1). Достоверность данных результатов подтверждается исследованиями других авторов [25–27]. В частности, К. Weber *et al.* [25] отмечают, что электрофоретический метод обеспечивает высокую степень точности при определении молекулярной массы полипептидов. Р. Kittiphattanabawon *et al.* [27] методом электрофореза установили, что коллаген

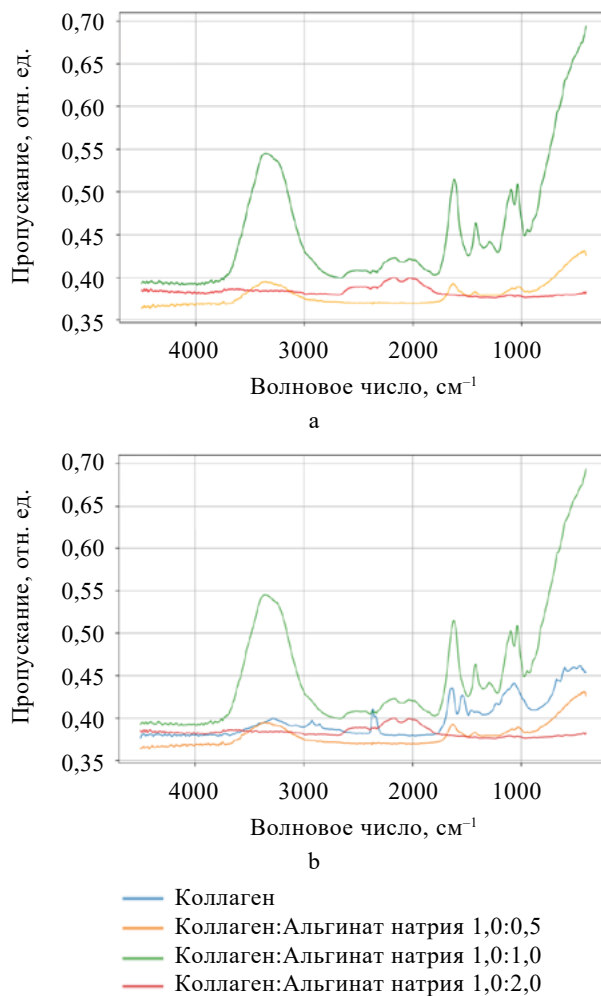


Рисунок 6. Спектры поглощения гелей на основе
коллагена: a – *Aurelia aurita*; b – *Sander lucioperca*

Figure 6. Absorption spectra of collagen-based gels:
a – *Aurelia aurita*; b – *Sander lucioperca*

медузы *Chrysaora* sp. представлен тремя пептидными цепями: α -цепью ($\alpha 1$) и двумя димерными β -цепями с молекулярной массой в диапазоне от 137 до 241 кДа. Подтверждено, что коллаген, экстрагированный из морских рыб, включая *S. lucioperca*, может состоять из двух полипептидных цепей ($\alpha 1$ и $\alpha 2$) с молекулярной массой, варьирующейся от 97,0 до 126 кДа [28]. Электрофорез в полиакриламидном геле с додецилсульфатом натрия в сочетании со спектральным анализом в УФ-видимой области позволил идентифицировать в коже *S. lucioperca* коллаген I типа, состоящий из двух различных α -цепей ($\alpha 1$ и $\alpha 2$) с высокой молекулярной массой, близкой к 220 кДа [29], что коррелирует с полученными в настоящем исследовании данными. Таким образом, результаты электрофоретического анализа подтверждают, что примененный метод кислотной экстракции позволил получить нативный, неденатурированный коллаген. Это является важным условием для дальнейшего изучения его функциональных свойств и проверки

гипотезы о целесообразности его применения в качестве сырьевого компонента для производства биологических каркасов в технологии культивированного мяса.

О сохранении нативной структуры белка может говорить и его изоэлектрическая точка (pI), т. к. известно, что значение pI зависит только от аминокислотного состава белка. Значение pI является точкой сингулярности на кривой титрования, соответствующей pH раствора, при котором суммарный поверхностный заряд, а значит и подвижность белка равны нулю [30]. Этот параметр регулярно указывается в базах данных белков и может служить косвенным предиктором при выборе оптимального значения pH для культивирования клеток при разработке технологий культивированного мяса [31]. Именно поэтому в данном исследовании были проведены измерения изоэлектрической точки коллагена, выделенного из морских организмов. Согласно эмпирическим данным (рис. 2), изоэлектрическая точка коллагена *A. aurita* составила 5,20; для коллагена *S. luciopectus* – 4,9. Поскольку значение изоэлектрической точки зависит от способа выделения макромолекулы, полученное в настоящем исследовании значение pI, сопоставимое с литературными данными, свидетельствует о том, что выделенный образец представляет собой нативный коллаген [32]. Так например, изоэлектрическая точка коллагена медузы *Acromitus hardenbergi* варьируется в интервале 4,46–5,40 [32], что зависит от метода, с помощью которого экстрагирован коллаген. Согласно данным, представленным в работе E. Balıkcı *et al.* [33], коллаген, выделенный из *A. aurita*, характеризуется значением pI 4,46. Доказано, что коллаген с изоэлектрической точкой между 4,0 и 5,5 демонстрирует лучшую биосовместимость при физиологическом pH [34, 35], следовательно, на нем активнее происходит рост и развитие клеток, в т. ч. стволовых и мышечных стволовых клеток [36–38]. Производство культивированного мяса основано на использовании мышечных стволовых клеток, которые расположены на базальной пластинке мышечных волокон – структурной единице мышечной ткани [36, 37]. Таким образом, коллаген морского происхождения благодаря низкому значению изоэлектрической точки может быть рассмотрен в качестве перспективного сырья для производства каркасов, применяемых в технологии культивируемого мяса.

Характерной особенностью коллагена является его уникальный аминокислотный состав, ключевыми элементами которого выступают глицин, пролин и специфическая для этого белка аминокислота – гидроксипролин [39]. Гидроксипролин, образующийся в результате посттрансляционной модификации пролина после сборки полипептидной цепи, играет решающую роль в стабилизации тройной спирали коллагена [40]. Типичная тропоколлагеновая структура включает приблизительно 21 % пролина, 35 % глицина, 11 % аланина и гидроксипролина, при этом для коллагена характерно отсутствие в его составе аминокислоты цис-

теина [39, 41, 42]. Результаты, полученные в данной работе, показывают, что коллаген, экстрагированный из *A. aurita*, богат глицином и пролином (массовая доля 24 %). Коллаген, выделенный из *A. aurita*, не содержит цистеина (рис. 3а, табл. 1). Эмпирические данные по аминокислотному составу коллагена, выделенного из кожи *S. luciopectus*, также подтверждают отсутствие цистеина, при этом массовая доля глицина и пролина достигает 10 % (рисунок 3б, табл. 1). Такой состав обеспечивает формирование тройной спиральной структуры, которая обуславливает высокую механическую стабильность и прочность на разрыв, а также структурную сложность молекулы [43]. Как отмечается в работе M. Zhu *et al.*, наличие пролина и гидроксипролина является основой для образования прочной тройной спирали коллагена [44]. E. Cadar *et al.*, указывают на то, что гидроксипролин, находящийся в Y-положении, значительно повышает стабильность спиральной конформации коллагена [41]. Более того, тройная спиральная структура способствует образованию межмолекулярных связей, включая водородные связи и силы Ван-дер-Ваальса, что обеспечивает высокую стабильность молекулы [45]. Благодаря свойствам – механической прочности, биосовместимости, контролируемой биоразлагаемости и структурной гибкости, коллаген стал фундаментальным компонентом в разработке биоматериалов и может рассматриваться в качестве перспективного сырья для создания каркасов в технологии культивированного мяса [43].

Важно отметить, что гидролизат коллагена, представленный трипептидами, демонстрирует высокую биодоступность и эффективно усваивается в ЖКТ человека [45, 46], что позволяет рассматривать его не только в качестве структурного каркаса для биопроизводства культивированного мяса, но и как дополнительный источник аминокислот. Согласно последним данным *in vitro*, протеолитическое расщепление коллагена приводит к образованию не только свободных аминокислот, но и биологически активных олигопептидов, характеризующихся пониженной поверхностной гидрофобностью и выраженными антиоксидантными свойствами [47]. Исследование аминокислотного состава коллагена, извлеченного из кожи *S. luciopectus* и биомассы *A. aurita*, показало различия в профиле аминокислот, включая несколько незаменимых: валин, изолейцин, лейцин, метионин, фенилаланин, треонин и гистидин (табл. 1). Таким образом, потребление культивированного мяса, произведенного с использованием таких каркасов, может способствовать дополнительному обогащению рациона человека незаменимыми аминокислотами. Полученные результаты подтверждают обоснованность выбора данной макромолекулы в качестве основы для трехмерных каркасов (скаффолдов).

Скаффолды, выполняющие функцию искусственного внеклеточного матрикса, обеспечивают поддержку клеточной адгезии и пролиферации. Клетки, культивируемые на таких структурах *in vitro*, впоследствии

могут быть использованы для безопасного употребления в пищу. В то время как Y. Xu *et al.* [6] предлагают использовать желатин в качестве заменителя белков внеклеточного матрикса, в настоящей работе в качестве перспективного материала для скаффолдов предлагается морской коллаген, выделенный из *A. aurita* и кожи *S. lucioperca*. Можно предположить, что каркасы на его основе будут обладать удовлетворительными физико-биологическими свойствами, обеспечивающими необходимую механическую поддержку. Для верификации гипотезы о применимости морского коллагена в качестве скаффолда была проведена оценка его безопасности и биосовместимости с использованием МТТ-теста на клеточной линии первичных коровьих фибробластов. Данный тест, широко применяемый для предварительной оценки цитотоксичности биоматериалов *in vitro*, эффективно определяет повреждение митохондрий, что коррелирует с показателем клеточной жизнеспособности [48, 49]. Результаты, полученные через 24 ч после инкубации (табл. 2), показали, что жизнеспособность фибробластов при контакте с коллагеном из *A. aurita* составила $80,67 \pm 0,58 \%$; из кожи *S. lucioperca* – $79,85 \pm 0,96 \%$. Эти данные свидетельствуют о высокой биосовместимости исследуемых образцов и отсутствии цитотоксического эффекта. Аналогичные выводы были сделаны S.W. Vedakumari *et al.*, которые, используя МТТ-тест на фибробластах NIH3T3, подтвердили, что коллагеновый скаффолд сохраняет клеточную жизнеспособность, что указывает на его биосовместимость и нетоксичность [48]. J. Hadi *et al.* отмечают, что растущие клетки способны адгезировать к каркасным материалам, таким как коллагеноподобные гели, которые служат поддерживающей сетью для развития ткани [50]. Результаты, полученные K. Ahmad *et al.*, также подтверждают высокую биосовместимость и низкую антигенность коллагена и возможность его применения для улучшения клеточной адгезии и в качестве носителя для клеточных культур [37].

В связи с этим заключительный этап исследования был посвящен оценке способности морского коллагена к гелеобразованию и его пригодности для 3D-биопечати с целью создания скаффолдов. Представленные данные (рис. 4) демонстрируют, что коллаген обладает способностью формировать гели, сохраняющие заданную форму и структуру. Таким образом, коллаген из биомассы *A. aurita* и кожи *S. lucioperca* может быть рекомендован как сырье для создания каркасов. Для точного воспроизведения внеклеточного матрикса критически важна трехмерная (3D) архитектура скаффолда, содержащая взаимосвязанную поровую сеть в вязкоупругой матрице. Такой каркас регулирует клеточное поведение, обеспечивает структурную поддержку и опосредует межклеточную коммуникацию [51, 52]. Результаты биопечати (рис. 5) показали, что гели на основе морского коллагена позволяют формировать решетчатую структуру. Однако было отмечено,

что после гелеобразования происходит изменение объема (усадка) и уменьшение толщины нитей, что необходимо учитывать при проектировании объектов заданных размеров, применяя соответствующие коэффициенты масштабирования.

На основании проведенных исследований можно сделать вывод о том, что использование коллагеновых каркасов способствует получению культивированного мяса с правильно организованной волокнистой структурой, приближенной к натуральной [6]. Для анализа функциональных групп и вторичной структуры коллагена и продуктов на его основе применялась ИК-Фурье спектроскопия. Этот метод позволяет идентифицировать функциональные группы [29, 53, 54] и устанавливать корреляции между строением и свойствами молекулы [44, 55]. Спектры поглощения исследованных образцов (рис. 6) демонстрируют характерные для белков пики: амид А в области $3300\text{--}3500\text{ см}^{-1}$, соответствующий валентным колебаниям N–H связей; амид I ($1600\text{--}1700\text{ см}^{-1}$), связанный с колебаниями карбонильных групп C=O, и амид II ($1510\text{--}1570\text{ см}^{-1}$). Наличие этих полос подтверждает коллагеновую природу исследуемых образцов. Пики в области около 1100 см^{-1} могут быть отнесены к колебаниям амино- или гидроксильных групп аминокислотных остатков [56]. Таким образом, ИК-спектроскопия подтвердила наличие основных функциональных групп, характерных для коллагена, и показала, что процесс гелеобразования не приводит к значительным изменениям в его молекулярной структуре. В результате настоящего исследования доказано, что морской коллаген из *A. aurita* и кожи *S. lucioperca* может использоваться в качестве биоматериала для создания скаффолдов, необходимых для производства культивированного мяса. Каркасы на основе биосовместимого коллагена безопасны и могут употребляться в пищу как в приготовленном, так и в сыром виде. Данный материал соответствует ключевым требованиям, предъявляемым к скаффолдам: безопасность, экономическая эффективность и доступность для крупномасштабного производства [38]. Ограничением полученных результатов является отсутствие данных о механических свойствах разработанных гидрогелей. Как отмечено в работе [51], эффективные скаффолды должны обладать соответствующими материальными и механическими характеристиками для поддержки искусственно созданной ткани

Выводы

Проведены комплексные исследования, характеризующие физико-химические свойства и биотехнологический потенциал коллагена, выделенного из биомассы *Aurelia aurita* и кожи *Sander lucioperca*. Электрофоретическим методом установлено, что изучаемый коллаген состоит из двух полипептидных цепей (α -цепей и β -цепей) с молекулярной массой 240 кДа (для коллагена *A. aurita*) и 220 кДа (для двух цепей коллагена, выделенного из кожи *S. lucioperca*). С помощью

измерения дзета-потенциала растворов коллагена показано, что полученный из морских животных коллаген имеет оптимальное значение изоэлектрической точки, которое необходимо для протекания процессов роста и развития культуры клеток, в т. ч. стволовых и мышечных стволовых клеток (изоэлектрическая точка коллагена *A. aurita* составила 5,20; для коллагена *S. lucio-perca* – 4,90).

Доказано, что жесткость коллагена и его структурные (каркасные) функции обусловлены уникальным аминокислотным составом молекулы. Методом капиллярного электрофореза установлено, что изучаемый коллаген содержит семь незаменимых аминокислот (валин, изолейцин, лейцин, метионин, фенилаланин, треонин, гистидин) и поэтому может рассматриваться не только в качестве каркаса для производства культивированного мяса, но и как дополнительный источник аминокислот в организме человека.

С помощью МТТ-теста продемонстрировано, что исследуемые коллагены обладают высокой биосовместимостью и характеризуются отсутствием цитотоксического эффекта. Оценка гелеобразования позволила выявить способность коллагена сохранять форму и структуру в виде решетки.

Таким образом, результаты проведенного исследования свидетельствуют о том, что коллаген биомассы *A. aurita* и кожи *S. lucio-perca* может быть использован для создания гелей как биокаркасов, необходимых для производства культивированного мяса. Стоит отметить, что для использования коллагена в качестве биоматериала для создания каркасов необходимо изучить его механические свойства. В литературе показано,

что успешные каркасы должны обладать соответствующими материальными и механическими свойствами для поддержки искусственно созданной ткани.

Критерии авторства

Ю. В. Куликова – 35 %, Д. И. Спорышева – 15 %, М. А. Ташкинов – 10 %, С. Ю. Носкова – 10 %, О. О. Бабич – 30 %.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарности

Авторы выражают благодарность Министерству науки и высшего образования Российской Федерации, контракт № 075-15-2023-601 (доб. регистрационный № 13.2251.21.0219).

Contribution

Yu.V. Kulikova – 35%, D.I. Sporysheva – 15%, M.A. Tashinov – 10%, S.Yu. Noskova – 10%, O.O. Babich – 30%.

Conflict of interest

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

Acknowledgements

The authors express their sincere gratitude to the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation.

Список литературы / References

1. Gu H, Kong Y, Huang D, Wang Y, Raghavan V, *et al.* Scaling cultured meat: Challenges and solutions for affordable mass production. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 2025;24(4):e70221. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.70221>
2. Gu Y, Li X, Chan ECY. Risk assessment of cultured meat. *Trends in Food Science & Technology*. 2023;138:491–499. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2023.06.037>
3. Berners-Lee M, Kennelly C, Watson R, Hewitt CN. Current global food production is sufficient to meet human nutritional needs in 2050 provided there is radical societal adaptation. *Elementa: Science of the Anthropocene*. 2018;6(1):52. <https://doi.org/10.1525/elementa.310>
4. Park SM, Ryoo JH, Kwon HC, Han SG. Scaffold biomaterials in the development of cultured meat: A review. *Food Science of Animal Resources*. 2025;45(3):688–710. <https://doi.org/10.5851/kosfa.2025.e13>
5. Post MJ, Levenberg S, Kaplan DL, Genovese N, Fu J, *et al.* Scientific, sustainability and regulatory challenges of cultured meat. *Nature Food*. 2020;1(7):403–415. <https://doi.org/10.1038/s43016-020-0112-z>
6. Xu Y, Liu D, Zhang X, Yang J, Cao J, *et al.* Functionalized gelatin-based materials: Advancing bio-fabrication applications for cell-cultured meat. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 2025;24(6):70306. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.70306>
7. Jung S, Choi B, Lee M, Park S, Choi W, *et al.* Bio-orchestration of cellular organization and human-preferred sensory texture in cultured meat. *ACS nano*. 2025;19(2):2809–2821. <https://doi.org/10.1021/acsnano.4c15622>
8. Bomkamp C, Skaalure SC, Fernando GF, Ben-Arye T, Swartz EW, *et al.* Scaffolding biomaterials for 3D cultivated meat: prospects and challenges. *Advanced Science*. 2022;9(3):2102908. <https://doi.org/10.1002/advs.202102908>
9. Imran M, Liyan Z. Production of plant-based meat: functionality, limitations and future prospects. *Food Research and Technology*. 2023;249(9):2189–2213. <https://doi.org/10.1007/s00217-023-04287-w>

10. Kulikova Yu, Sukhikh S, Zhikhreva A, Noskova S, Babich O. Comparative analysis of collagen from different sources for wound and burn management. *BMT*. 2025;00013. <https://doi.org/10.12336/bmt.25.00013>
11. Socrates R, Nagarajan S, Bechelany M, Kalkura N. Collagen based biomaterials for tissue engineering applications: A review. *Processes and Phenomena on the Boundary Between Biogenic and Abiogenic Nature*. 2019;3–22. https://doi.org/10.1007/978-3-030-21614-6_1
12. Amirrah IN, Lokanathan Y, Zulkiflee I, Wee MMR, Motta A, et al. A comprehensive review on collagen type I development of biomaterials for tissue engineering: From biosynthesis to bioscaffold. *Biomedicines*. 2022;10(9):2307. <https://doi.org/10.3390/biomedicines10092307>
13. Cen L, Liu W, Cui L, Zhang W, Cao Y. Collagen tissue engineering: Development of novel biomaterials and applications. *Pediatric research*. 2008;63(5):492–496. <https://doi.org/10.1203/pdr.0b013e31816c5bc3>
14. Kozik W, Polak-Bielawska D, Kutaj A, Savitskaya T. Collagen as a bioactive ingredient in nutricosmetology – A review. *Quality in Sport*. 2025;46:66618. <https://doi.org/10.12775/QS.2025.46.66618>
15. Ferreira AM, Gentile P, Chiono V, Ciardelli G. Collagen for bone tissue regeneration. *Acta Biomaterialia*. 2012;8(9):3191–3200. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2012.06.014>
16. Bronzino J. The biomedical engineering handbook. Boca Raton: CRC Press; 2000. 3189 p.
17. Ezati P, Khan A, Bhattacharya T, Zaitoon A, Zhang W, et al. Recent Advances in collagen and collagen-based packaging materials: A review. *ACS Food Science & Technology*. 2025;5(5):1767–1784. <https://doi.org/10.1021/acsfoodscitech.4c00938>
18. Barzideh Z, Latiff AA, Gan CY, Benjakul S, Karim AA. Isolation and characterisation of collagen from the *Ribbon jellyfish (Chrysaora sp.)*. *International Journal of Food Science and Technology*. 2014;49(6):1490–1499. <https://doi.org/10.1111/ijfs.12464>
19. Nashchekina YA, Sirotkina MY, Darvish DM, Barsuk IA, Moskalyuk OA, et al. The effect of carbodiimide on the structural, mechanical and biological properties of collagen films. *Cell and Tissue Biology*. 2021;15(6):586–593. <https://doi.org/10.1134/S1990519X21060079>
20. Rangel-Garcia AM, Alvarez-Perez MA, Rivera-Torres F, Piña-Barba MC. Study of the effect of two different chemical cross-linking agents (EDC/NHS and genipin) on the physical, chemical, and mechanical properties of collagen, polycaprolactone, and chitosan scaffolds. *Biomedical Materials & Devices*. 2025;3:1491–1500. <https://doi.org/10.1134/S1990519X21060079>
21. Каргин В. А., Слонимский Г. Л. Краткие очерки по физико-химии полимеров. М.: Химия, 1967. 232 с. [Kargin V. A., Slonimsky G. L. Brief essays on the physical chemistry of polymers. Moscow: Khimia; 1967. 232 p. (In Russ.)]
22. Ahmad M, Benjakul S, Nalinanon S. Compositional and physicochemical characteristics of acid solubilized collagen extracted from the skin of unicorn leatherjacket (*Aluterus monoceros*). *Food Hydrocolloids*. 2010;24:588–594. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2010.03.001>
23. Barzideh Z, Latiff AA, Gan CY, Benjakul S, Karim AA. Isolation and characterisation of collagen from the Ribbon jellyfish (*Chrysaora sp.*). *International Journal of Food Science and Technology*. 2014;49(6):1490–1499. <https://doi.org/10.1111/ijfs.12464>
24. Li P, Wu G. Roles of dietary glycine, proline, and hydroxyproline in collagen synthesis and animal growth. *Amino acids*. 2018;50(1):29–38. <https://doi.org/10.1007/s00726-017-2490-6>
25. Weber K, Osborn M. The reliability of molecular weight determinations by dodecyl sulfate-polyacrylamide gel electrophoresis. *Journal of Biological Chemistry*. 1969;244(16):4406–4412. [https://doi.org/10.1016/S0021-9258\(18\)94333-4](https://doi.org/10.1016/S0021-9258(18)94333-4)
26. Felician FF, Yu R-H, Li M-Z, Li C-J, Chen H-Q, et al. The wound healing potential of collagen peptides derived from the jellyfish *Rhopilema esculentum*. *Chinese Journal of Traumatology*. 2019;22(1):12–20. <https://doi.org/10.1016/j.cjtee.2018.10.004>
27. Kittiphattanabawon P, Benjakul S, Visessanguan W, Shahidi F. Isolation and characterization of collagen from the cartilages of brownbanded bamboo shark (*Chiloscyllium punctatum*) and blacktip shark (*Carcharhinus limbatus*). *LWT*. 2010;43(5):792–800. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2010.01.006>
28. Srinivasan S, Durairaj B. Collagen isolation and characterization from *Sardinella longiceps*. *Journal of Advanced Veterinary and Animal Research*. 2021;8(4):679–686. <https://doi.org/10.5455/javar.2021.h560>
29. Abinaya M, Gayathri M. Biodegradable collagen from *Scomberomorus lineolatus* skin for wound healing dressings and its application on antibiofilm properties. *Journal of cellular biochemistry*. 2019;120(9):15572–15584. <https://doi.org/10.1002/jcb.28824>
30. Righetti PG. Determination of the isoelectric point of proteins by capillary isoelectric focusing. *Journal of chromatography A*. 2004;1037(1–2):491–499. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2003.11.025>
31. Kantardjieff KA, Rupp B. Protein isoelectric point as a predictor for increased crystallization screening efficiency. *Bioinformatics*. 2004;20(14):2162–2168. <https://doi.org/10.1093/bioinformatics/bth066>
32. Khong NMH, Yusoff FMd, Jamilah B, Basri M, Maznah I, et al. Improved collagen extraction from jellyfish (*Acromitus hardenbergi*) with increased physical-induced solubilization processes. *Food Chemistry*. 2018;251:41–50. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.12.083>

33. Balıkcı E, Baran ET, Tahmasebifar A, Yılmaz B. Characterization of collagen from jellyfish *Aurelia aurita* and investigation of biomaterials potentials. *Applied Biochemistry and Biotechnology*. 2024;196(6):1–22. <https://doi.org/10.1007/s12010-023-04848-5>
34. Vlierberghe SV, Graulus G-J, Samal KS, Nieuwenhove IV, Dubrue P. Porous hydrogel biomedical foam scaffolds for tissue repair. In *Biomedical Foams for Tissue Engineering Applications*. 2014;335–390. <https://doi.org/10.1533/9780857097033.2.335>
35. Perez-Puyana V, Jiménez-Rosado M, Romero A, Guerrero A. Fabrication and characterization of hydrogels based on gelatinised collagen with potential application in tissue engineering. *Polymers*. 2020;12(5):1146. <https://doi.org/10.3390/polym12051146>
36. Kim M, Jung HY, Jo C. Fundamental study on structural formation, amino acids and nucleotide-related compounds of cultivated meat from 3D-cultured pig muscle stem cells. *Food Science and Biotechnology*. 2024;34(2):457. <https://doi.org/10.1007/s10068-024-01793-9>
37. Ahmad K, Lim JH, Lee EJ, Chun HJ, Ali S, *et al.* Extracellular matrix and the production of cultured meat. *Foods*. 2021;10(12):3116. <https://doi.org/10.3390/foods10123116>
38. Post MJ, Levenberg S, Kaplan DL, Genovese N, Fu J, *et al.* Scientific, sustainability and regulatory challenges of cultured meat. *Nature food*. 2020;1(7):403–415. <https://doi.org/10.1038/s43016-020-0112-z>
39. Gauza-Włodarczyk M, Kubisz L, Włodarczyk D. Amino acid composition in determination of collagen origin and assessment of physical factors effects. *International journal of biological macromolecules*. 2017;104:987–991. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.07.013>
40. Moreno HM, Montero MP, Gómez-Guillén MC, Fernández-Martín F, Mørkøre T, *et al.* Collagen characteristics of farmed *Atlantic salmon* with firm and soft fillet texture. *Food chemistry*. 2012;134(2):678–685. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.02.160>
41. Cadar E, Pesterau AM, Prasacu I, Ionescu AM, Pascale C, *et al.* Marine antioxidants from marine collagen and collagen peptides with nutraceuticals applications: A Review. *Antioxidants*. 2024;13(8):919. <https://doi.org/10.3390/antiox13080919>
42. Ryu B, Shin KH, Kim SK. Muscle protein hydrolysates and amino acid composition in fish. *Marine Drugs*. 2021;19:377–389. <https://doi.org/10.3390/md19070377>
43. Emam AN. Collagen and collagen-derived materials: synthesis, structure, classification, fundamental properties and biomedical applications. *Discover Applied Sciences*. 2025;7(10):1114. <https://doi.org/10.1007/s42452-025-07780-x>
44. Zhu M, Li S, Chen L, Cheng C, Yu J, *et al.* Insights into microstructure, physicochemical characteristics and functional properties of collagen extracted from various livestock skins. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2025;105(14):7779–7787. <https://doi.org/10.1002/jsfa.70023>
45. Wang J, Wang H, Shi X, Xu L. Research progress on extraction methods, bioactivity, and food industry applications of collagen from livestock and poultry slaughter by-products: A review. *Journal of Food Measurement and Characterization*. 2026;1–14. <https://doi.org/10.1007/s11694-025-03965-5>
46. López-Yoldi M, Riezu-Boj JI, Abete I, Ibero-Baraibar I, Aranaz P, *et al.* I. Anti-obesity effects of a collagen with low digestibility and high swelling capacity: A human randomized control trial. *Nutrients*. 2024;16(20):3550. <https://doi.org/10.3390/nu16203550>
47. Wang M, Liu Y, Pallarés N, El Marsni Z, Kousoulaki K, *et al.* Determination of collagen types and mineral contents in fish skin and collagen-containing skin-derived protein hydrolysates before and after *in vitro* simulated digestion. *Food & Function*. 2025;16(3):1032–1040. <https://doi.org/10.1039/D4FO03137G>
48. Vedakumari SW, Prabakaran L, Pravin YR. Preparation and characterization of marine collagen scaffolds for biomedical applications. *Regenerative Engineering and Translational Medicine*. 2026;1–8. <https://doi.org/10.1007/s40883-025-00554-2>
49. Venkatesan P, Puvvada N, Dash R, Kumar BNP, Sarkar D, *et al.* The potential of celecoxib-loaded hydroxyapatite-chitosan nanocomposite for the treatment of colon cancer. *Biomaterials*. 2011;32:3794–806. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2011.01.027>
50. Hadi J, Brightwell G. Safety of alternative proteins: technological, environmental and regulatory aspects of cultured meat, plant-based meat, insect protein and single-cell protein. *Foods*. 2021;10:1226. <https://doi.org/10.3390/foods10061226>
51. Tahir I, Floreani R. Dual-crosslinked alginate-based hydrogels with tunable mechanical properties for cultured meat. *Foods*. 2022;11(18):2829. <https://doi.org/10.3390/foods11182829>
52. Волкова Н. А., Юрченко К. А., Дегирменджи Э. Т., Саенко Ю. С., Фомочкина И. И. и др. Биопринтинг с использованием экструзионных методик и оптимальные биоматериалы для Д-биопечати компонентов кожи. *Крымский журнал экспериментальной и клинической медицины*. 2025. Т. 14. № 4. С. 84–95. [Volkova NA, Yurchenko KA, Degirmendzhi ET, Saenko YuS, Fomochkina II, *et al.* Bioprinting using extrusion techniques and optimal biomaterials for D-bioprinting of skin components. *Crimean Journal of Experimental and Clinical Medicine*. 2025;14(4):84–95. (In Russ.)]
53. Норбоева М. А., Джалилов А. Т., Соттикулов Э. С., Норбоев А. А. Получение формиата натрия на основе щелочного окисления формальдегида и исследование его термических и спектральных свойств. *Химия и биология*. 2026. № 3. С. 33–39. [Norboeva MA, Dzhililov AT, Sottikulov ES, Norboev AA. Sodium formate production by alkaline oxidation of formaldehyde: Thermal and spectral properties. *Chemistry and Biology*. 2026;3:33–39. (In Russ.)] <https://doi.org/10.32743/UniChem.2026.139.1.21557>

54. Макарова Е. Л., Кожокина О. М. Исследование механизма взаимодействия глюкоамилазы с коллагеном методом ИК-спектроскопии. Прикладные информационные аспекты медицины. 2025. Т. 28. № 3. С. 85–94. [Makarova EL, Kozhokina OM. Interaction of glucoamylase with collagen by IR spectroscopy. Applied Information Aspects of Medicine. 2025;28(3):85–94. (In Russ.)] <https://doi.org/10.18499/2070-9277-2025-28-3-85-94>

55. Тимченко П. Е., Фролов О. О., Рябов Н. А., Тимченко Е. В., Волова Л. Т. и др. Алгоритм идентификации разных форм аллогенного коллагенсодержащего материала как основы для биочернил с помощью оптических методов анализа. Оптика и спектроскопия. 2024. Т. 132. № 4. С. 353–357. [Timchenko PE, Frolov OO, Ryabov NA, Timchenko EV, Volova LT, *et al.* An algorithm for identifying allogeneic collagen-containing materials for bioink: Optical analysis methods. Optics and Spectroscopy. 2024;132(4):353–357. (In Russ.)]

56. Iqbal B, Muhammad N, Jamal A, Ahmad P, Khan ZUH, *et al.* An application of ionic liquid for preparation of homogeneous collagen and alginate hydrogels for skin dressing. Journal of Molecular Liquids. 2017;243:720–725. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2017.08.101>

Дополнительная информация об авторах / Additional information about the authors

Куликова Юлия Владимировна / Yuliya V. Kulikova ORCID 0000-0002-0896-4571; eLIBRARY SPIN 6907-7280
Спорышева Дарья Ивановна / Daria I. Sporysheva ORCID 0009-0009-0166-2384; eLIBRARY SPIN 2151-2367
Ташкинов Михаил Анатольевич / Mikhail A. Tashkinov ORCID 0000-0003-4660-0020; eLIBRARY SPIN 7694-2129
Носкова Светлана Юрьевна / Svetlana Yu. Noskova ORCID 0000-0003-1198-1951; eLIBRARY SPIN 1884-7403
Бабищ Ольга Олеговна / Olga O. Babich ORCID 0000-0002-4921-8997; eLIBRARY SPIN 2744-9496

ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ АВТОРОВ

Журнал «Техника и технология пищевых производств (Food Processing: Techniques and Technology)» предназначен для публикации статей, посвященных проблемам пищевой и смежных отраслей промышленности.

Статья должна отвечать профилю журнала, обладать научной новизной, публиковаться впервые.

Рукопись научной статьи, поступившая в редакцию журнала, рассматривается ответственным за выпуск на предмет соответствия профилю журнала и требованиям к оформлению, проверяется оригинальность представленного текста с помощью интернет-ресурса – <https://antiplagiat.ru>, регистрируется.

В журнале публикуются только рукописи, текст которых рекомендован рецензентами. Редакция организует «двухстороннее слепое» (анонимное) рецензирование представленных рукописей. Выбор рецензентов осуществляется решением главного редактора или его заместителя. Для проведения рецензирования рукописей статей в качестве рецензентов могут привлекаться как члены редколлегии журнала «Техника и технология пищевых производств (Food Processing: Techniques and Technology)», так и высококвалифицированные ученые и специалисты других организаций и предприятий, обладающие глубокими профессиональными знаниями и опытом работы по конкретному научному направлению, как правило, доктора наук, профессора. Все рецензенты являются признанными специалистами по тематике рецензируемых материалов и имеют в течение последних 3 лет публикации по тематике рецензируемой статьи.

Рецензенты уведомляются о том, что присланные им рукописи являются частной собственностью авторов и относятся к сведениям, не подлежащим разглашению. Рецензентам не разрешается делать копии статей для своих нужд. Рецензирование проводится конфиденциально. Нарушение конфиденциальности возможно только в случае заявления рецензента о недостоверности или фальсификации материалов, изложенных в статье.

Срок рассмотрения статьи не должен превышать трех месяцев со дня получения статьи на рецензирование.

Оригиналы рецензий хранятся в редакции издания в течение пяти лет со дня публикации статей. Если в рецензии имеется указание на необходимость исправления статьи, то она направляется автору на доработку. Если статья по рекомендации

рецензента подверглась значительной авторской переработке, то она направляется на повторное рецензирование тому же рецензенту, который сделал критические замечания. Редакция оставляет за собой право отклонения статей в случае неспособности или нежелания автора учесть пожелания редакции журнала.

При наличии отрицательных рецензий на рукопись от двух разных рецензентов или одной отрицательной рецензии на ее доработанный вариант статья отклоняется от публикации без рассмотрения другими членами редколлегии. Автору не принятой к публикации статьи ответственный за выпуск направляет мотивированный отказ. Фамилия рецензента может быть сообщена автору лишь с согласия рецензента.

Решение о возможности публикации после рецензирования принимается главным редактором, а при необходимости – редколлегией в целом.

Для публикации статей необходимо вносить плату (APC). Оплата производится только после получения положительных рецензий и утверждения главным редактором статьи в номер. За подачу рукописи статьи в редакцию журнала, ее проверку и рецензирование плата не взимается. Более подробно ознакомиться с условиями платы, скидками и привилегиями можно на <https://fppt.ru>

Редакция журнала направляет авторам представленных материалов копии рецензий или мотивированный отказ, а также обязуется направлять копии рецензий в Министерство науки и высшего образования Российской Федерации при поступлении в редакцию издания соответствующего запроса.

Редакция журнала «Техника и технология пищевых производств (Food Processing: Techniques and Technology)» не хранит рукописи, не принятые к печати.

Рукописи печатаются, как правило, в порядке очередности их поступления в редакцию. В исключительных случаях редакционная коллегия имеет право изменить очередность публикации статей.

Журнал «Техника и технология пищевых производств (Food Processing: Techniques and Technology)» является журналом открытого доступа (open access). Все материалы журнала распространяются на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЬИ

Объем статьи должен быть не менее 30–35 тыс. знаков (не включая списки литературы на русском и английском языках). Объем обзорной рукописи – более 35 тыс. знаков.

Оформление текста (форматирование): поля по 20 мм, одинарный интервал без переносов, лишние пробелы и абзацных интервалов, шрифт Times New Roman, 10 кегль. Следует избегать перегрузки статей большим количеством формул, дублирования одних и тех же результатов в таблицах и графиках.

Графики, диаграммы и т. п. (желательно цветные), созданные средствами Microsoft Office и Corel Draw, должны допускать возможность редактирования и направляются в редакцию отдельными файлами в форматах tiff, jpeg, cdr, excel.

Каждая таблица, график, диаграмма и т. п. должны иметь заголовки и порядковые номера, в тексте статьи должны присутствовать ссылки на каждую из них.

Структура статьи:

1. Тип статьи;
2. Название статьи;
3. Инициалы и фамилии всех авторов;
4. Официальное полное название учреждения;
5. E-mail автора, с которым следует вести переписку;
6. Аннотация (разбивается на разделы: «Введение», «Объекты и методы исследований», «Результаты и их обсуждение», «Выводы»);
7. Ключевые слова;
8. Финансирование;

9. Текст статьи (обязательные разделы: «Введение», «Объекты и методы исследований», «Результаты и их обсуждение», «Выводы»);

10. Критерии авторства;

11. Конфликт интересов;

12. Благодарности;

13. Список литературы;

14. References;

15. Сведения об авторах (на русском и английском языках).

Подать рукопись можно на сайте журнала <https://fppt.ru>, или отправив на e-mail fppt98@gmail.com

В редакцию предоставляются:

1. Электронная версия статьи в программе MSWord. Файл статьи следует назвать по фамилии первого автора – ПетровГП.doc.;
 2. Сканированная электронная версия статьи, подписанная всеми авторами, в формате pdf;
 3. Гарантийное письмо (скан-копия) на имя главного редактора журнала на бланке направляющей организации с указанием даты регистрации и исходящего номера, с заключением об актуальности работы и рекомендациями к опубликованию, с подписью руководителя учреждения;
 4. Издательский лицензионный договор;
 5. Согласие на обработку Персональных данных;
 6. Согласие на распространение Персональных данных;
 7. Согласие на трансграничную передачу Персональных данных.
- Более подробная информация на <https://fppt.ru>

СОДЕРЖАНИЕ

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 1	Арипова Ф. К., Данилова Е. Д., Бойко Е. В., Кадырбаев М., Ражабов А. И., Душанова Г. А., Дранников А. А., Литвинова Е. А. Влияние препарата Юнигель Плантам на физиологические параметры растений ячменя в условиях водного дефицита 111
Варданын Л. Р., Торосян Н. С., Оганесян Н. Р., Торосян Г. О. Оценка антиоксидантной активности листьев деревьев для дальнейшего использования в качестве экологических консервантов 16	Сергун В. П., Шамова М. М., Позняковский В. М., Сергеева И. Ю. Влияние параметров механоактивации на выход и свойства биологически активных веществ коры <i>Populus tremula</i> L. 122
Рогов Г. Н., Смирнова Т. С., Топникова Е. В. Исследования по подбору пропионовых кислот бактерий для бескорковых полутвердых сыров 26	Калькова Н. Н., Ярош О. Б., Бабак С. Е. Детерминанты и поведенческие особенности при выборе молока потребителями на региональном рынке Крыма 135
Якубова О. С., Кушбанова А. А., Захарова М. В. Пищевая и биологическая ценность вторичного сырья осетровых объектов товарной аквакультуры Астраханской области 44	Лобзанова М. Е., Сухих А. С., Альтишлер О. Г., Иванова С. А. Исследование влияния некоторых кислот на процесс растворимости фолиевой кислоты 154
Буренков С. С., Заушинцева А. В. Биохимический состав и лекарственные свойства <i>Inonotus obliquus</i> Pil. 57	Фролова А. С., Миленьева И. С., Колпакова Д. Е., Неверова О. А., Юстратов В. П., Петров А. Н. Комплексная характеристика штаммов <i>Lactobacillus</i> как перспективных компонентов пробиотических консорциумов 164
Куренков С. А., Куренкова Л. А., Смыков И. Т., Гнездилова А. И. Электронно-микроскопические и реологические исследования структуры концентрированного молочного продукта с сахаром и сахарозаменителем 72	Боков Д. О., Бессонов В. В., Колеснов А. Ю. Пищевая добавка Е334 (винная кислота): актуальные вопросы контроля качества и безопасности 180
Хамханова Д. Н., Ханхалаева И. А., Битиева Э. Б., Соколова Ю. А., Дамдинсүрэн Э. Оценивание неопределенности измерения при определении плотности молока 86	Куликова Ю. В., Спорышева Д. И., Ташкинов М. А., Носкова С. Ю., Бабич О. О. Оценка физико-химических и биотехнологических свойств материалов из морского коллагена 190
Семенихин С. О., Фабрицкая А. А., Дашева Н. М. Получение целлюлозы и гemicеллюлоз из депектинизированного и делигнифицированного свекловичного жома 97	

CONTENTS

Kuchina Yu.A., Kolotova D.S., Tolstikov V.V., Vasilevich V.V., Derkach S.R. Effect of Enzyme Type and Concentration on Fish Protein Hydrolysates from <i>Gadus morhua</i> Processing Waste 2	Aripova F.K., Danilova E.D., Boyko E.V., Kadyrbaev M., Rajabov A.I., Dushanova G.A., Drannikov A.A., Litvinova E.A. Effect of Unigel Plantum on Barley under Water Deficit 112
Vardanyan L.R., Torosyan N.S., Hovhannisyan H.R., Torosyan G.H. Tree Leaves as Environmentally Friendly Preservatives: Evaluation of Antioxidant Activity 17	Sergun V.P., Shamova M.M., Poznyakovsky V.M., Sergeeva I.Yu. Mechanically Activated Extraction of Bioactive Substances from <i>Populus tremula</i> L. Bark: Yield and Functional Properties 123
Rogov G.N., Smirnova T.S., Topnikova E.V. Studies on the Selection of Propionic Acid Bacteria for Rindless Semi-Hard Cheeses 27	Kalkova N.N., Yarosh O.B., Babak S.E. Factors and Behavioral Patterns of Milk Consumption in the Crimea 136
Iakubova O.S., Kushbanova A.A., Zaharova M.V. Nutritional Value of Sturgeon Recyclables in Astrakhan Region 45	Lobzanova M.E., Sukhikh A.S., Altshuler O.G., Ivanova S.A. Effect of Acidic Media on Folic Acid Solubilization Patterns 155
Burenkov S.S., Zaushintsena A.V. Biochemical Composition and Medicinal Properties of <i>Inonotus obliquus</i> Pil. 58	Frolova A.S., Milentyeva I.S., Kolpakova D.E., Neverova O.A., Yustratov V.P., Petrov A.N. <i>Lactobacilli</i> in Probiotic Consortia: Profile and Prospects 165
Kurenkov S.S., Kurenkova L.A., Smykov I.T., Gnezdilova A.I. Sugar vs. Sugar Substitutes in Condensed Dairy Products: Electron Microscopy and Rheology 73	Bokov D.O., Bessonov V.V., Kolesnov A.Yu. Food Additive E334 (Tartaric Acid): Quality Control and Safety 181
Khamkhanova D.N., Khankhalaeva I.A., Bitueva E.B., Sokolova Yu.A., Damdinsuren E. Measurement Uncertainty in Milk Density Tests 87	Kulikova Yu.V., Sporysheva D.I., Tashkinov M.A., Noskova S.Yu., Babich O.O. Physicochemical and Biotechnological Properties of Marine Collagen Materials 191
Semenikhin S.O., Fabritskaya A.A., Daisheva N.M. Obtaining Cellulose and Hemicelluloses from Depectinized and Delignified Sugar Beet Pulp 98	